جامعة دمشق
كلية الهندسة المدنية
قسم الهندسة الإنشائية

التسليح الأصغري اللازم في الجوائز البيتونية المسلحة

دراسة أعدت لنيل درجة الماجستير في الهندسة الإنشائية

إعداد المهندسة
تماضر مقبل

بإشراف الدكتور المهندس
هيثم زرزور

دمشق 2010

جامعة دمشق
كلية الهندسة المدنية
قسم الهندسة الإنشائية

التسليح الأصغري اللازم في الجوائز البيتونية المسلحة

دراسة أعدت لنيل درجة الماجستير في الهندسة الإنشائية

إعداد المهندسة

تماضر مقبل

بإشراف الدكتور المهندس

هيثم زرزور

لجنة الحكم السادة الأساتذة:

د. علي تريكية	الأستاذ المساعد في قسم الهندسة الانشائية	كلية الهندسة المدنية
جامعة تشرين	الاختصاص: البيتون المسلح	عضواً
د. زهير عامر	المدرس في قسم الهندسة الإنشائية	كلية الهندسة المدنية
جامعة دمشق	الاختصاص: البيتون المسلح	عضواً
د. هيثم زرزور	المدرس في قسم الهندسة الإنشائية	كلية الهندسة المدنية
جامعة دمشق	الاختصاص: البيتون المسلح	عضواً

ملخص البحث

يقدم هذا البحث دراسة حول تحديد النسبة الأصغرية للتسليح في الجوائز البيتونية المسلحة والخاضعة للانعطاف، حيث تم في **الفصل الأول** عرض موجز للأبحاث التي عالجت هذا الموضوع، ومن ثم تم في **الفصل الثاني** عرض المبدأ الأساسي الذي تعتمده الكودات في تحديد نسب تسليح أصغرية خاصة بها مع مقارنة بين نسب التسليح الأصغرية وفق عدد من الكودات. في **الفصل الثالث** تم التركيز على نسبة التسليح الأصغرية في الكود العربي السوري من خلال مقارنتها مع علاقات المبدأ الأساسي، وبيان علاقة الكود العربي السوري بتجارب أجريت على جوائز مسلحة بتسليح قليل، بعد ذلك تم في **الفصل الرابع** بيان العوامل التي تؤثر على نسبة التسليح الأصغرية والتي تم أخذها في الحسبان من قبل نماذج نظرية تم توضيح اثنين منها في **الفصل الخامس** هما نموذج ميكانيكية الانكسار الخطي المرن (Linear Elastic Fracture Mechanics) ونموذج الطول الفعال للانزلاق (Effective slip-length) حيث تم عرض الأسس التي ينطلق منها كل نموذج مع العلاقات التي اعتمد عليها للوصول إلى صيغ جديدة نحسب من خلالها نسب التسليح الأصغرية وكذلك تم إدراج المنحنيات التي توضح كيفية تغير هذه النسب مع تغير البارامترات التي يأخذها كل نموذج في الحسبان، ثم في **الفصل السادس** تمت مقارنة نسب التسليح الأصغرية وفق النماذج النظرية مع نسبة التسليح الأصغرية وفق الكود العربي السوري لمعرفة موضعه بالنسبة لهذه النماذج، وفي **الفصل السابع** والأخير تمت النمذجة والتحليل باستخدام برنامج ABAQUS لحالات مختبرة في دراسات تجريبية أجريت في مركز أبحاث معتمد على جوائز بيتونية تختلف بالمقطع والنحافة ونسب التسليح، حيث أمكن من خلال هذه التجارب التحقق من نسبة التسليح الأصغرية المحددة وفق النموذج الأول نموذج ميكانيكية الانكسار، ومن خلال النمذجة التي تمت باستخدام برنامج ABAQUS تم الحصول على النتائج ثم مقارنتها مع النتائج التجريبية والنظرية بالاستعانة ببرنامج Excel.

في النهاية خلصنا إلى نتائج وتوصيات والتي نأمل أن يستفيد منها كل المهتمين والباحثين بهذا الموضوع.

الكلمات المفتاحية:

نسبة التسليح الأصغري، الجوائز البيتونية المسلحة، الانهيار، الانزلاق والتماسك.

مقدّمة البحث والهدف منه

تكاثفت الجهود مؤخّراً للبحث في مسألة التسليح الأصغري اللازم في الجوائز البيتونية المسلحة، وقد تم تسليط الضوء بشكل أساسي في هذا البحث على الجوائز البيتونية المعرضة للانعطاف الصافي لتحديد نسب تسليح أصغري لها تمنع حصول الانهيار المفاجئ و الهش فيها .

إن المبدأ الذي تعتمده الكودات لتحديد نسبة التسليح الأصغرية في حالة الانعطاف يقوم على مقاومة قضبان التسليح المشدود العزم المسبب لتشكل أول شق بعد حدوثه مباشرة، مما جعل إجهاد خضوع الفولاذ f_y ومقاومة البيتون $f`_c$ هما العاملين الرئيسين في علاقة نسبة التسليح الأصغرية لأغلب الكودات.

بينت دراسات نظرية وتجريبية حديثة لباحثين عدة منهم كاربينتري [8]، بوسكو [8]، رويز[17]، برينكر[6]، وفيرو[8]... وغيرهم أنه بالإمكان تخفيض نسبة التسليح الأصغرية عن الحد الذي تفرضه الكودات مع المحافظة على أمان الجائز. انطلق هؤلاء الباحثين في نماذجهم النظرية من أسس ومبادئ عديدة، فمنهم من اعتمد ميكانيكية الانكسار، ومنهم من أخذ التماسك الحاصل بين البيتون والفولاذ بعين الاعتبار، ومنهم من راعى موضوع الطاقة المتحررة من الجائز أثناء حصول التشوه. باستخدام النماذج أمكن الحصول على علاقات جديدة تحدد النسبة الأصغرية للتسليح وتأخذ بالحسبان عوامل متعددة إضافية مثل ارتفاع الجائز – إجهاد التماسك– تغطية البيتون للتسليح وغيرها من العوامل، وبمقارنة قيمالنسبة الأصغرية للتسليح وفق هذه العلاقات ووفق علاقات الكودات، وُجد بأن قيم النسبة الأصغرية للتسليح وفق أغلب الكودات أكبر، الأمر الذي يدعونا إلى إعادة النظر في علاقات الكودات ومنها الكود العربي السوري حتى يتم تعديل النسب الأصغرية للتسليح وبالتالي نقلل من الهدر الحاصل في الفولاذ.

تكمن أهمية البحث في توضيح بعض الدراسات الحديثة المتعلقة بمسألة التسليح الأصغري اللازم في الجوائز البيتونية ومقارنة العلاقة الواردة في الكود العربي السوري مع هذه الدراسات.

سوف يتم في هذا البحث دراسة تأثير البارامترات المختلفة على نسبة التسليح الأصغرية: كإجهاد خضوع التسليح– المقاومة المميزة للبيتون على الضغط– ارتفاع الجائز– تغطية البيتون للتسليح ، وسيتم تقديم اقتراحات لتحسين العلاقة الموجودة في الكود العربي السوري.

الفصل الأول

CHAPTER ONE

موجز لدراسات سابقة

ABSTRACT OF FORMER STUDIES

1-1 موجز لدراسات سابقة حول موضوع البحث

زاد الاهتمام في الفترة الأخيرة بمسألة تحديد النسبة الأصغرية للتسليح في الجوائز البيتونية المسلحة من قبل العديد من الباحثين، ويمكن تصنيف الأبحاث التي تناولت هذا الموضوع ضمن أربعة محاور تتلخص بما يلي:

1-1-1 دراسة تعتمد معيار ميكانيكية الانكسار (Fracture Mechanics)

1- (Carpinteri, Ferro, Bosco 1993) [8] قدموا نموذج يعتمد ميكانيكية الانكسار الخطي المرن (LEFM) الذي يأخذ أثر الشق على قساوة العنصر حيث توصل الباحثون من خلال هذا النموذج إلى معيار جديد هو معيار عدد الهشاشة (Brittleness number) يتم من خلاله حساب القيمة الأصغرية لنسبة التسليح التي تمكن العنصر الخاضع للانعطاف من تفادي الانهيار الهش. وتبين نتيجة لهذا النموذج أن قيمة النسبة الأصغرية للتسليح تتأثر بارتفاع الجائز بحيث تنقص كلما زاد ارتفاع الجائز .

2- (Carpinteri, Ferro, Bosco 2003) [13] قدموا نموذج آخر هو نموذج الشق المترابط أو الشقالمجسّر (Bridged crack model)، حيث تم البرهان على أنه أداة جيدة في اختبار سلوك العناصر الإنشائية في حالة الانعطاف، ومن خلاله تم إظهار أن قيمة نسبة التسليح الأصغرية تتوقف على حجم العنصر الإنشائي.استُخدم في النموذج ميكانيكية الانكسار الخطي المرن (Linear Elastic Fracture Mechanics) وتم إدخال عمل الإجهادات التي تساهم في غلق الشق نتيجة الألياف الموضوعة في البيتون كالألياف الفولاذية أو الزجاجية حيث تضاف هذه المساهمة إلى عمل التسليح الموجود في منطقة الشد. تبين من خلال هذا النموذج أن شكل الانهيار يتعلق بالخواص الميكانيكية وأيضاً بحجم العنصر الإنشائي.

1-1-2 دراسة تأخذ أثر التماسك في الحسبان

1- (Ruiz, Elices, Planas 1996) [17] قدموا نموذج الطولالفعّال للانزلاق (effective slip – length model) الذي يأخذ أثر التماسك والانزلاق بين البيتون والتسليح على استجابة العنصر ويفرض أن قيمة إجهاد التماسك ثابتة على الطول الذي يحدث عنده الانزلاق، أيضاً يفرض هذا النموذج أن الشق مترابط وينقل إجهادات بين وجهيه حتى يصبح عرض الشق مساوياً إلى

العرض الحرج. ساعد هذا النموذج في فهم السلوك الميكانيكي للجوائز ذات التسليح القليل وبالأخص مسألة الانتقال من السلوك الهش إلى السلوك اللدن من خلال اعتماد أبحاث تجريبية أجريت على جوائز بسيطة الاستناد أوضحت أثر نسبة التسليح – قوة التماسك-ارتفاع الجائز وإجهاد خضوع التسليح على استجابة الجوائز. من خلال التحليلات العددية لهذا النموذج تم الوصول إلى علاقة لحساب التسليح الأصغري في حالة الانعطاف يدخل فيها أثر إجهاد التماسك بحيث كلما كان إجهاد التماسك أكبر كلما كان التسليح الأصغري المطلوب أكبر، كما تبين أن أثر إجهاد التماسك على نسبة التسليح الأصغرية يتوقف بشكل كبير على تفاصيل الجائز وبالأخص على تغطية البيتون للتسليح.

2- (Fantilli.A.P, Vallini.P 1999) [12] اعتمد هذان الباحثان نموذج يُدخل أثر التماسك على استجابة العنصر بحيث تم رسم المخطط الفعلي لإجهاد التماسك الحاصل على طول الانزلاق، أي تم أخذ القيمة الحقيقية لإجهاد التماسك. حلل هذا النموذج الانتقال من مرحلة ما قبل التشقق إلى مرحلة ما بعد التشقق مفترضاً وجود علاقة بين التماسك والانزلاق ومفترضاً أيضاً حصول شق وحيد مترابط استُخدم هذا النموذج في حساب النسبة الأصغرية للتسليح وتبين من خلاله أن النسبة الأصغرية للتسليح تتعلق بأبعاد الجائز.

3-1-1 دراسة تعتمد على مبدأ الطاقة

1- (Ozbolt, Bruckner.1999) [12-16] في هذه الدراسة تم مناقشة اعتبارات مختلفة عن ما هو موجود في الدراسات السابقة فيما يخص مسألة تحديد النسبة الأصغرية للتسليح، حيث درس موضوع ارتفاع الجائز بتفصيل أكبر. أجريت تحليلات عددية على جوائز بيتونية بأحجام مختلفة ومن خلال مقارنة النتائج العددية لهذا النموذج مع النتائج التجريبية تبين أن النسبة الأصغرية لا تتعلق بحجم الجائز وحسب بل أيضاً بخواص المواد وكذلك بكمية وشكل توزع التسليح في المقطع، حيث أن وجود تسليح موزع على ارتفاع الجائز يؤدي إلى خفض القيمة الأصغرية لنسبة التسليح التي تؤمن استقرار العنصر. أيضاً بحثت هذه الدراسة في موضوع الطاقة المتحررة من الشق الحاصل أثناء بدء انهيار البيتون، وحتى لا يكون الانهيار انفجاري يجب أن تكون هذه الطاقة المتحررة أصغر من الطاقة التي يبددها التسليح. إن هذا الشرط محقق في الجوائز ذات الأبعاد الصغيرة نسبياً، وبالتالي من أجل تحديد التسليح الأصغري في الجوائز الصغيرة نسبياً يكفي التحقق من شرط توازن القوى، في حين أن كبر كمية الطاقة المتحررة في الجوائز ذات الأبعاد الكبيرة نسبياً يفرض التحقق من شرط

توازن القوى وأيضاً التحقق من أن الطاقة المتحررة أثناء تشكل الشق أصغر من الطاقة التي يبددها التسليح، ليتم تفادي الانهيار الهش والحصول على جوائز استجابتها مستقرة.

1-1-4 دراسة تأخذ أثر الإجهادات القسرية في العناصر السميكة

1- (Helmus.1990) [14]اهتمت هذه الدراسة بتأثير الإجهادات القسرية على العناصر السميكة ذات الارتفاعات الكبيرة، وكمثال على الإجهادات القسرية الإجهادات الناتجة عن التغيرات الحرارية التي يتعرض لها العنصر والتي تسبب تشققات قد تؤدي إلى انهياره قبل وضعه في الاستثمار، لذلك تم تحديد نسبة تسليح أصغرية لتقاوم هذا النوع من الإجهادات وبالتالي تحد من اتساع التشققات وتمنع حصول الانهيار.

2-1 الخلاصة:

أعطى الاستعراض المرجعي لمحة موجزة عن النماذج النظرية التي تم التوصل من خلالها إلى صيغ وعلاقات جديدة تحدد نسب تسليح أصغري في الجوائز، وذلك من خلال التطرق لأربعة مواضيع رئيسية متعلقة بسلوك البيتون المشدود وكذلك التأثير المتبادل بين البيتون والتسليح وغيرها من العوامل التي تؤثر على قيمة هذه النسبة، من المؤكد أن جهود الباحثين كانت تنصب على تقديم علاقات تحقق الوفر بالتسليح من أجل تطوير علاقات الكودات الخاصة بحساب النسبة الأصغرية للتسليح والتي سيتم عرضها في الفصل القادم.

الفصل الثانـي

CHAPTER TWO

النسبة الأصغرية للتسليح في عدد من الكودات

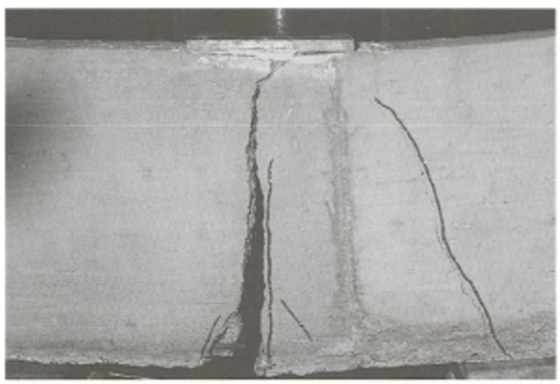
THE MINIMUM REINFORCEMENT RATIO IN SOME CODES

1-2 مقدمة

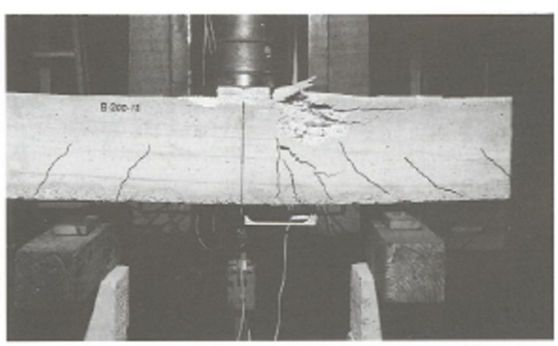
تخضع الجوائز البيتونية المسلحة لميكانيكيات انهيار مختلفة، وذلك بسبب الاختلاف في العديد من العوامل منفردة أو مجتمعة مثل نسبة التسليح، نحافة الجائز، حجم الجائز.

هناك ثلاث ميكانيكيات أساسية للانهيار تحدث نتيجة للأسباب التالية:

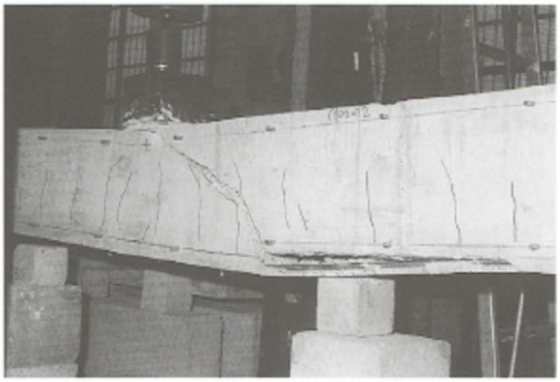
1. اتساع وامتداد الشقوق حتى يحصل الانهيار، وذلك بدءاً من الطرف المشدود من الجائز الخاضع للانعطاف شكل(2−1).
2. انضغاط وتحطم الطرف المضغوط من الجائز الخاضع للانعطاف نتيجة لتجاوز الإجهادات فيه تحمل البيتون على الضغط شكل(2−2).
3. تشكل شقوق القص المائلة في الجائز حتى حصول انهيار الجائز على القص شكل(2−3).



شكل (2−1) الانهيار نتيجة اتساع الشق



شكل (2−2) الانهيار نتيجة تحطم المنطقة المضغوطة



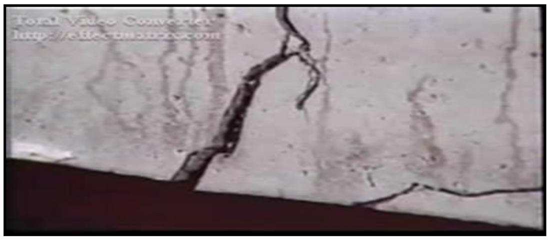
شكل (2−3) الانهيار نتيجة تشكل شقوق القص المائلة

وسنركز في بحثنا على الميكانيكية الأولى من ميكانيكيات الانهيار والتي نمنع حدوثها بوضع تسليح يحقق حد أصغري يمنع حصول الانهيار الهش المفاجئ ويجعل الانهيار لدناً يسمح بحصول تشققات شكل (2−4).



ا

انهيار هش



انهيار لدن

شكل (2−4)الانهيار الهش و الانهيار اللدن للبيتون

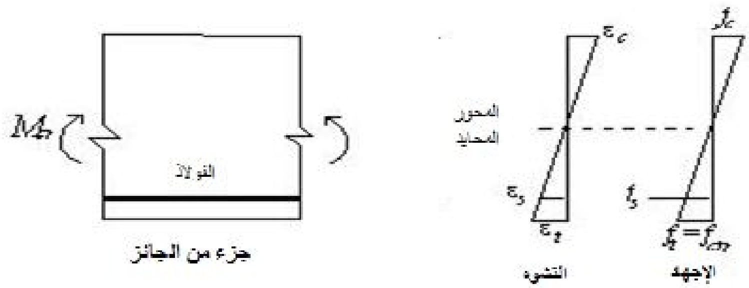
إن القيمة الأصغرية للتسليح المعتمدة في الكودات تتباين بشكل واضح ولكن جميعها تنطلق من المبدأ نفسه الذي سيتم شرحه لاحقاً .

2-2 المبدأ الأساسي المعتمد في حساب النسبة الأصغرية للتسليح [2]

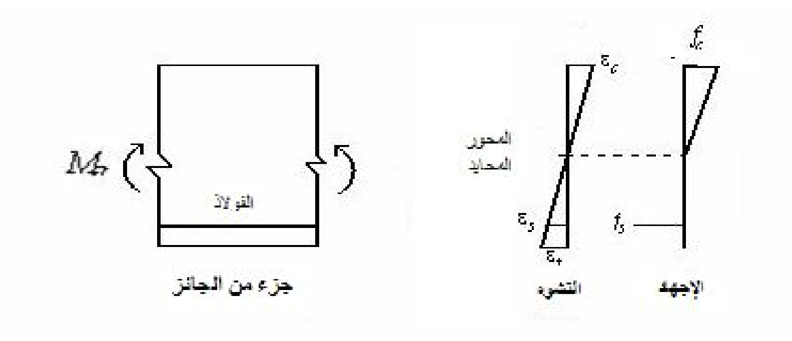
إن المبدأ الأساسي المعتمد في حساب النسبة الأصغرية للتسليح ينطلق من تحقيق الشرط التالي:

" *يجب أن تقاوم قضبان التسليح المشدود عزم الانعطاف المسبب لتشكل أول شق بعد حصوله مباشرة*"

إن الشكل (2−5) يوضح مخطط الإجهاد لمقطع البيتوني المسلح قبل وبعد تشققه مباشرة



مخططات المقطع قبل التشقق مباشرة



مخططات المقطع بعد التشقق مباشرة

شكل (2−5) مخططات الإجهاد والتشوه للمقطع البيتوني الخاضع للعزم قبل وبعد التشقق مباشرة

وبالتالي فإن العزم الذي يتحمله المقطع قبل التشقق مباشرة هو:

$$M_{cr}=f_{ct}\,(bd^2/6) \qquad (2\text{-}1)$$

والعزم الذي يتحمله المقطع بعد التشقق مباشرة هو :

$$M_{cr}=A_{smin}\,z\,f_s \qquad (2\text{-}2)$$

حيث :

A_{smin} أقل مقطع عرضي لقضبان التسليح العامل على الشد.

b عرض المقطع المستطيل .

d الارتفاع الفعّال للمقطع.

f_{ct} مقاومة البيتون على الشد.

z ذراع المزدوجة الداخلية ويساوي نحو (0.8-0.9d) .

f_s المقاومة الحسابية للتسليح على الشد وتؤخذ مساوية لإجهاد الخضوع (f_y) العادي أو الاصطلاحي حسب نوع الفولاذ .

بفرض أن النسبة الأصغرية للتسليح هي

$$\mu_{min} = A_{smin}/(bd)$$

وبمساواة العلاقة (1-2) و(2-2) من أجل z=0.8d ثم z=0.9d نحصل على علاقات النسبة الأصغرية للتسليح (2-3a) و (2-3b) في منطقة الشد على الترتيب، الجدول (2−1) يبين قيم نسب التسليح وفق هاتين العلاقتين من أجل بعض الحالات.

$$\mu_{min}=0.204\ f_{ct}/f_y \quad (z=0.8d) \qquad (2\text{-}3a)$$

$$\mu_{min}=0.185\ f_{ct}/f_y \quad (z=0.9d) \qquad (2\text{-}3b)$$

إن علاقات المبدأ الأساسي كما هو واضح أعلاه يدخل فيها إجهاد خضوع التسليح ومقاومة البيتون على الشد، في حين أن قيم النسبة الأصغرية للتسليح المعتمدة في الكودات تتباين بشكل واضح وهذا ما سنراه في الفقرة القادمة.

$\frac{f_{ct}}{f_y}$	1/400	1/300	1/200	1/100
μ_{min}(2-3a)	0.051	0.068	0.102	0.204
μ_{min}(2-3b)	0.0463	0.0677	0.0925	0.185

الجدول(2−1) نسب التسليح الدنيا وفق العلاقات (2-3a) و (2-3b)

2-3 العلاقات المعتمدة في عدد من الكودات في حساب النسبة الأصغرية للتسليح

2-3-1 الكود الروسي SNIP 2.03.01-84 [18]

يعتمد قيمة ثابتة للنسبة الأصغرية للتسليح وهي

$$\boxed{\mu_{\min} = 0.15\%} \qquad (2\text{-}4)$$

2-3-2 الكود الأوروبي EC2-02 [11]

يحدد الكود الأوروبي التسليح اللازم من أجل التحكم بالتشققات في المناطق التي قد يتوقع حصول الشد فيها، انطلاقاً من معادلة التوازن بين قوة الشد في البيتون قبل تشكل الشق مباشرة، و قوة الشد في الفولاذ بعد تشكل الشق مباشرة سواء وصل لمرحلة الخضوع أم لم يصل.

يحسب التسليح الأصغري من أجل المقاطع المستطيلة وفق الكود الأوروبي كما يلي:

$$A_{s,\min}\,\sigma_s = k_c k\ f_{ct,eff}\,Act \ \geq 0.0013\ b_t d$$

حيث:

$A_{s,min}$ مساحة التسليح في منطقة الشد.

A_{ct} مساحة المقطع البيتوني ويساوي:

$$A_{ct}=b_t d$$

b_t عرض المقطع الذي يحصل عنده الشد، في حالة المقطع المستطيل يكون b_t مساوياً لـ b عرض المقطع.

d الارتفاع الفعّال للمقطع.

σ_s أعظم إجهاد وصل إليه الفولاذ بعد تشكل الشق مباشرة ويمكن اعتبارها مساوية f_{yk} إجهاد الخضوع للفولاذ.

k_c عامل يأخذ طبيعة توزع الإجهادات في المقطع قبل حصول الشق مباشرة، ففي حال كان المقطع خاضعاً للشد الصافي يكون $k_c=1$

أما في حالة تعرض المقطع المستطيل لانعطاف صافي أو انعطاف مترافق مع قوى محورية، فإن هذا العامل يحسب من العلاقة :

$$k_c = 0.4\left[1+\frac{\sigma_c}{k_1(h/h^*)f_{ct,eff}}\right]\le 1$$

σ_c الإجهاد في البيتون نتيجة لوجود القوى المحورية، ويأخذ قيمة سالبة في حال كانت القوة ضاغطة.

h^* تتوقف قيمته على قيمة ارتفاع المقطع

في حال كان $h < 1m$ يكون $h^*=h$

في حال كان $h \geq 1m$ يكون $h^*=1m$

k_1 عامل يأخذ تأثير القوة المحورية على توزع الإجهادات في المقطع

فإذا كانت القوة ضاغطة يكون $k_1=1.5$

فإذا كانت القوة شادة يكون $k_1=2h^*/3h$

k عامل يأخذ تأثير شكل توزع الإجهادات وأبعاد العنصر ويساوي في حالة الجوائز 0.65 .

وبالتالي ومما سبق ومن أجل جائز بيتوني معرض للانعطاف يكون:

$$\mu_{min} = 0.26\frac{f_{ctm}}{f_{yk}} \geq 0.0013 \qquad (2\text{-}5)$$

حيث

f_{yk} إجهادالخضوع للفو لاذ.

f_{ctm} القيمة الوسطية لمقاومة البيتون على الشد وتحسب كما يلي:

$$f_{ctm}=0.3\times f_{ck}^{(2/3)} \leq \text{ C50/60}$$

$$f_{ctm}=2.12\ \ln(1+(f_{cm}/10)) \geq \text{ C50/60}$$

f_{ck} هي المقاومة المميزة للبيتون على الضغط.

f_{cm} المقاومة الوسطية للبيتون على الضغط وتؤخذ بالشكل:

$$f_{cm}= f_{ck}+8(\text{MPa})$$

2-3-3 الكود الأمريكي ACI 318-02 [5]

إن القاعدة التي ينطلق منها الكود الأمريكي لحساب التسليح الأصغري هي تأمين بديل يحقق المقاومة المطلوبة بعد حصول التشقق، هذا البديل هو التسليح الموضوع في المنطقة التي يتوقع فيها حصول التشقق، وحتى يتحقق ما سبق يفرض الكود الحد التالي على مساحة التسليح الأصغري:

$$A_{s,\min} = 3\frac{\sqrt{f_c'}}{f_y} b_w d \geq \frac{200}{f_y} b_w d \quad \text{(psi and in)}$$

$$A_{s,\min} = \frac{\sqrt{f_c'}}{4 f_y} b_w d \geq \frac{1.4}{f_y} b_w d \quad \text{(MPa and mm)}$$

حيث

b_w تؤخذ مساوية لعرض المقطع المستطيل $b_w = b$.

d الارتفاع الفعّال للمقطع.

وبالتالي مما سبق نجد أن النسبة الأصغرية للتسليح حسب الكود الأمريكي هي:

$$\mu_{\min} = 3\frac{\sqrt{f_c'}}{f_y} \geq \frac{200}{f_y} \quad \text{(psi)}$$

$$\mu_{\min} = \frac{\sqrt{f_c'}}{4 f_y} \geq \frac{1.4}{f_y} \quad \text{(MPa)} \qquad (2\text{-}6)$$

2-3-4 الكود العربي السوري [1]

ينص الكود العربي السوري فيما يخص نسب التسليح الأصغرية في الجوائز في الفقرة (7-2-7-1) على ما يلي:

أ- لا تقل مساحة تسليح الشد الرئيسي في كل قطاع عن ($\frac{0.9}{f_y}$ × مساحة المقطع الفعّال).

ب- يمكن تخفيض المساحة الواردة في الفقرة (أ) أعلاه في الجوائز ذات القطاعات الأكبر مما هو مطلوب للمقاومة على أن لا تقل مساحة التسليح عن 1.33 مرة مساحة التسليح المطلوب في القطاع الحرج.

وبالتالي فإن مساحة التسليح الدنيا هي القيمة الأصغر من القيمتين التاليتين:

$$A_{s\,\min} = \frac{0.9}{f_y} .bd \qquad (2 - 7)$$

$$A_{s\,\min} = 1.33\, A_s \qquad (2 - 8)$$

A_s مساحة التسليح المحسوب والمقاوم لعزم الانعطاف المطبق على الجائز ذو المقطع المستطيل.

لنحسب التسليح A_s الموافق لتساوي $A_{s\,min}$ في العلاقة (2-7) و (2-8):

$$A_s = \frac{0.9}{1.33} \cdot \frac{bd}{f_y} \qquad (2\text{-}9)$$

إن العزم الذي يقاومه مقطع مسلح بتسليح أحادي باعتبار الفولاذ قد وصل لمرحلة الخضوع يعطى بالعلاقة:

$$M^* = A_s f_y z \qquad (2\text{-}10)$$

z ذراع المزدوجة الداخلية ويؤخذ $0.9d$ في حالة الانعطاف.

بتعويض (2-9) في (2-10) نجد:

$$M^* = \frac{0.9}{1.33} \frac{bd}{f_y} . f_y . 0.9d$$

$$M^* = 0.609 \; bd^2 \qquad (2\text{-}11)$$

وبالتالي عند تحديد التسليح الأصغري الواجب مراعاته نحن أمام حالتين وذلك بحسب قيمة العزم المطبق M بحيث:

- إذا كان $M > M^*$ يؤخذ التسليح الأصغري من العلاقة (2-7).
- إذا كان $M < M^*$ يؤخذ التسليح الأصغري من العلاقة (2-8).

تم رسم المنحني الذي يمثل العلاقة (2-11) التي تحدد M^* بحيث تم أخذ الحالات التالية:

أ- في الحالة الأولى شكل (2-6) تم أخذ ما يلي:

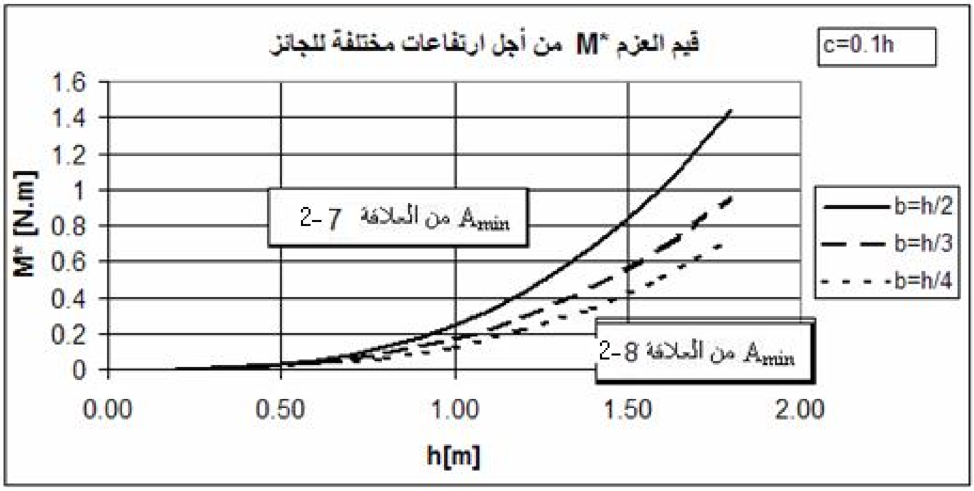
$$d = h - 0.1h$$

$$b = \frac{h}{2}, \frac{h}{3}, \frac{h}{4}$$

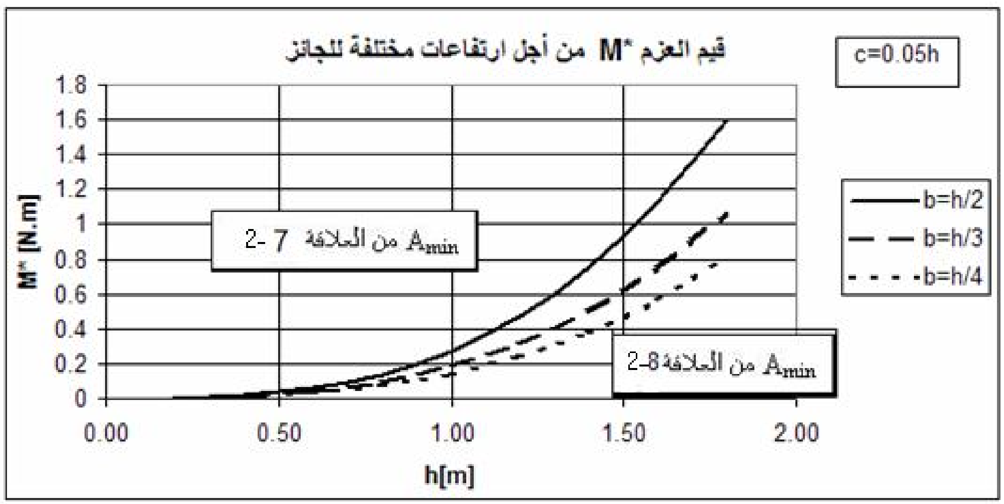
ب- في الحالة الثانية شكل (2-7) تم أخذ ما يلي:

$$d = h - 0.05\,h$$

$$b = \frac{h}{2}, \frac{h}{3}, \frac{h}{4}$$



الشكل (2–6) قيم العزم M^* حسب ما تعطيه العلاقة (2-11) عند c=0.1h



الشكل (2–7) قيم العزم M^* حسب ما تعطيه العلاقة (2-11) عند c=0.05h

من الشكلين السابقين نلاحظ أن تأثير العلاقة (2-8) يصبح واضحاً عند ارتفاعات تتجاوز 1[m] وقبل هذه القيمة لارتفاع الجائز فإن العلاقة (2-7) تكون مؤثرة بشكل كبير.

في بحثنا سيتم التركيز على جوائز بيتونية بارتفاعات لا تتجاوز 1[m] واعتبار عرض الجائز لا يتجاوز نصف الارتفاع، وبالتالي سيتم في الفصول القادمة مناقشة العلاقة (2-7) فقط التي نحسب من خلالها التسليح الأصغري ومنها تكون النسبة الأصغرية للتسليح وفق الكود العربي السوري هي:

$$\mu_{\min} = \frac{0.9}{f_y} \qquad (2\text{-}12)$$

4-2 مقارنة بين نسب التسليح الأصغرية وفق الكودات السابقة

تم حساب ومقارنة نسب التسليح الأصغرية وفق علاقات الكودات السابقة (الروسي – الأوروبي – الأمريكي – السوري)، وذلك باستخدام برنامج Excel، حيث تم في كل من الشكليين (2–8) و (2–9) رسم منحنيات تربط بين النسب الأصغرية للتسليح ومقاومة البيتون على الضغط، وذلك من أجل المواصفات التالية:

- المقطع المعتمد هو مقطع مستطيل.
- تم أخذ قيمتين لإجهاد الخضوع هما:

$$f_y=220,500\ [MPa]$$

- تم أخذ القيم التالية لمقاومة البيتون على الضغط:

$$f'_c=10,20,30,40,\ldots\ldots,80,90,100\ [MPa]$$

من خلال ملاحظة الشكلين (2–8) و (2–9) نلاحظ ما يلي:

- تقل قيم $\mu_{\min}$ وفق جميع الكودات بزيادة f_y.

- إن قيم $\mu_{\min}$ ثابتة ولا تتغير بتغير قيم $f_c^{'}$ وفق الكوديين السوري والروسي، في حين أن قيم $\mu_{\min}$وفق الكوديين الأمريكي والأوروبي تزداد بز يادة $f_c^{'}$.

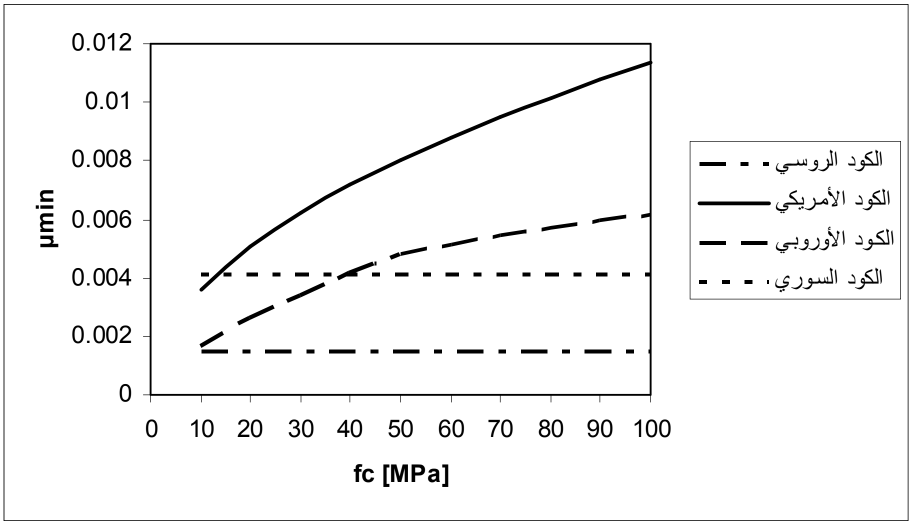
- تتطابق قيم $\mu_{\min}$ وفق الكود السوري والأوروبي عند $f_c^{'} = 40\,[\text{MPa}]$ ، ويكون ترتيب النسب الأصغرية للتسليح وفق هذه الكودات عند قيم لمقاومة البيتون أعلى من هذه القيمة بالشكل التصاعدي التالي:

  الكود الروسي – الكود السوري –الكود الأوروبي – الكود الأمريكي.

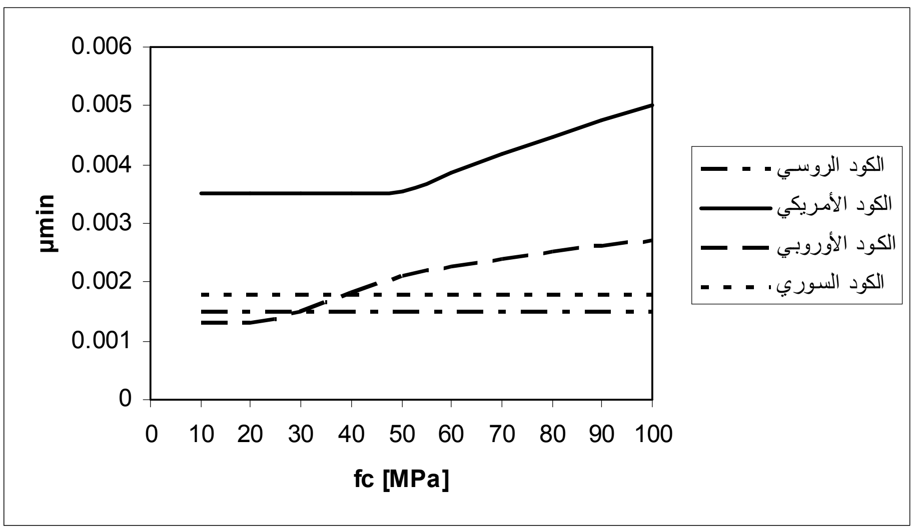
  ومن أجل قيم لمقاومة البيتون على الضغط أقل من $f_c^{'} = 40\,[\text{MPa}]$ تصبح قيم الكود الأوروبي أقل من قيم الكود السوري.

- بزيادة f_y يزداد مجال $f_c^{'}$ الذي يكون عنده قيم $\mu_{\min}$ ثابتة من أجل الكوديين الأمريكي والأوروبي.

- يجب الإشارة إلى أنه ليس لارتفاع المقطع تأثير على قيم $\mu_{\min}$ وفق جميع الكودات السابقة.



الشكل (2−8) نسب التسليح الأصغري كتابع لمقاومة البيتون على الضغط وفق عدد من الكودات من أجل f_y=220 [MPa]



الشكل (2−9) نسب التسليح الأصغري كتابع لمقاومة البيتون على الضغط وفق عدد من الكودات من أجل f_y=500 [MPa]

2−5 الخلاصة:

تم في هذا الفصل عرض المبدأ الذي تعتمده الكودات من أجل تحديد نسب خاصة بها، كما تم إجراء مقارنة بين نسب التسليح الأصغري وفق عدد من الكودات لمعرفة ترتيبها وأيضاً لمعرفة العوامل التي تأخذها بعين الاعتبار. وسيتم في الفصول القادمة التركيز على الكود السوري من ضمن هذه الكودات لأهميته بالنسبة لنا.

الفصل الثالث

CHAPTER THREE

أداء الكمرات البيتونية المسلحة بأقل من النسبة الأصغرية للتسليح المحددة وفق الكود العربي السوري

THE BEHAVIOR OF CONCRETE BEAMS WITH LESS THAN MINIMUM REINFORCEMENT RATIO ACCORDING TO SYRIAN CODE

3-1 مقدمة

تزايد الاهتمام بشكل ملحوظ بمسألة التسليح القليل وتحديد النسبة الأصغرية للتسليح المشدود الواجب استخدامه في العناصر الإنشائية المنفذة من البيتون المسلح، وسيتم هنا تسليط الضوء بشكل أساسي على أداء الجوائز الخاضعة للانعطاف، ولفهم أداء العناصر ذات التسليح القليل كان لابد من عرض مراحلونتائج تجارب تم إجراؤها في شروط تحميل خاصة تضمن استمرار عمليات القياس المطلوبة قام بها مُعد البحث فيوقت سابق ، ولكن بدايةً سنقارن قيم النسب الأصغرية للتسليح وفق الكود السوري مع قيم نسب التسليح الأصغرية التي تعطيها علاقات المبدأ الأساسي الذي تم شرحه في الفصل السابق.

3-2 مقارنة بين علاقات المبدأ الأساسي وعلاقة الكود العربي السوري

إن علاقات المبدأ الأساسي المعتمد لحساب نسب التسليح الأصغرية تم توضيحها في العلاقات (2-3a) و (2-3b) وهما:

$$\mu_{min}=0.204\ f_{ct}/f_y \quad (z=0.8d)$$

$$\mu_{min}=0.185\ f_{ct}/f_y \quad (z=0.9d)$$

ويظهر من العلاقات كما ذكرنا سابقاً تابعية نسبة التسليح الأصغرية وفق المبدأ الأساسي، إلى إجهاد خضوع التسليح و مقاومة البيتون على الشد.

إن علاقة نسبة التسليح الأصغرية وفق الكود السوري تعطى بالعلاقة (2-12) التي تم توضيحها سابقاً وهي:

$$\mu_{min} = \frac{0.9}{f_y}$$

ويظهر من العلاقة تابعية نسبة التسليح الأصغرية لإجهاد الخضوع فقط بحال المساحات القليلة.

سنجري مقارنة باعتماد برنامج Excel بين قيم نسب التسليح الأصغرية وفق علاقات المبدأ الأساسي ووفق علاقة الكود السوري الشكلين (3-1) و (3-2).

حيث تم أخذ المقاومات المميزة التالية للبيتون على الضغط:

$$f_c' = 15,18,20 \ \ [\text{MPa}]$$

ووفقاً للكود السوري فقرة (4−2−5−2−ب) فإن مقاومة البيتون على الشد f_{ctb} في حالة الانعطاف تعطى بالعلاقة (3-1) أما في حالة الشد فإن f_{ct} تؤخذ بمقدار 60% من f_{ctb} حسب الفقرة (4−2−6−3) كما في العلاقة (3-2):

$$f_{ctb} = 0.73\sqrt{f_c'} \qquad (3\text{-}1)$$

$$f_{ct} = 0.44\sqrt{f_c'} \qquad (3\text{-}2)$$

كما وتم أخذ القيم التالية لإجهاد خضوع الفولاذ

$$f_y = 240,300,400[MPa]$$

بحساب نسب التسليح الأصغرية μ_{min} وفق علاقات المبدأ الأساسي ووفق علاقة الكود السوري من أجل المعطيات السابقة نحصل على الجدولين (3−1) و(3−2).

بملاحظة الشكلين (3−1) و(3−2) نجد ما يلي:

- كلما زادت قيمة f_y انخفضت قيمة μ_{min} المطلوبة وفق علاقات المبدأ الأساسي ووفق علاقة الكود السوري.
- تزداد قيمة النسبة الأصغرية للتسليح μ_{min} مع زيادة قيمة مقاومة البيتون على الضغط f_c' وفق علاقات المبدأ الأساسي (2-3a) و(2-3b).
- الفرق الواضح بين قيم النسب الأصغرية للتسليح μ_{min} وفق الكود السوري وقيم النسب الأصغرية وفق علاقات المبدأ الأساسي، حيث تعطي علاقة الكود السوري قيم أكبر من القيم التي تعطيها علاقات المبدأ الأساسي.

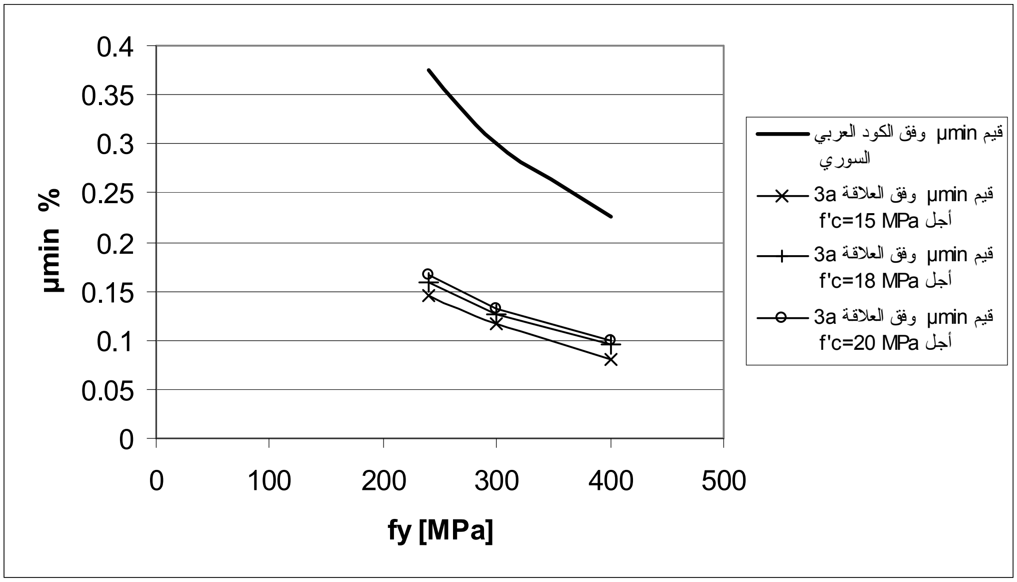
وبالتالي قد يكون هناك هدراً كبيراً في الفولاذ عند الالتزام بالحد الأصغري الذي يفرضه الكود العربي السوري للجوائز البيتونية المسلحة، الأمر الذي يستدعي إعادة النظر بطريقة تحديد قيم μ_{min} في الكود العربي السوري لمحاولة تخفيضها، ولكن يجب أن يترافق ذلك مع تحسين الاحتياطات الضرورية المتعلقة باستثمار المنشآت استثماراً طبيعياً وكذلك تطوير طرائق الحساب والوسائل التكنولوجية المستخدمة في مراحل البناء المختلفة .

μ_{min} %		الميزات الميكانيكية [MPa]		
العلاقة (2-3a)	ك.ع.س	f_y	f_{ct}	f'_c
0.145	0.375	240	1.7	15
0.116	0.300	300		
0.08	0.225	400		
0.159	0.375	240	1.87	18
0.127	0.300	300		
0.095	0.225	400		
0.167	0.375	240	1.96	20
0.133	0.300	300		
0.100	0.225	400		

الجدول (3−1) نسب التسليح الأصغرية وفقاً للكود السوري والعلاقة (2-3a)

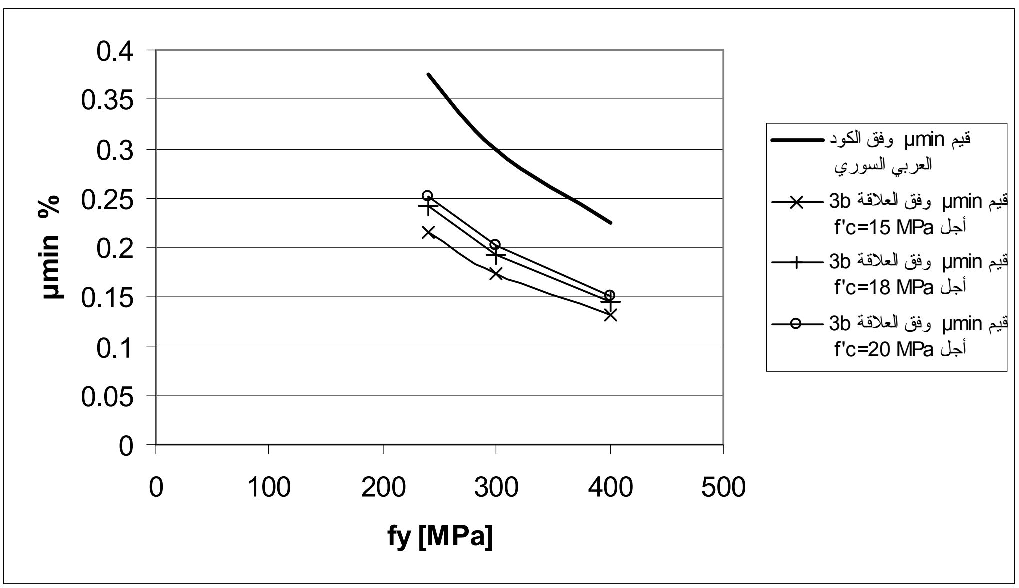
μ_{min} %		الميزات الميكانيكية [MPa]		
العلاقة (2-3b)	ك.ع.س	f_y	f_{ct}	f'_c
0.216	0.375	240	2.8	15
0.173	0.300	300		
0.131	0.225	400		
0.241	0.375	240	3.12	18
0.193	0.300	300		
0.144	0.225	400		
0.252	0.375	240	3.27	20
0.202	0.300	300		
0.151	0.225	400		

الجدول (3−2) نسب التسليح الأصغرية وفقاً للكود السوري والعلاقة (2-3b)



الشكل (3−1) نسب التسليح الأصغري كتابع لإجهاد خضوع الفولاذ من أجل الكود السوري والعلاقة

(2-3a)

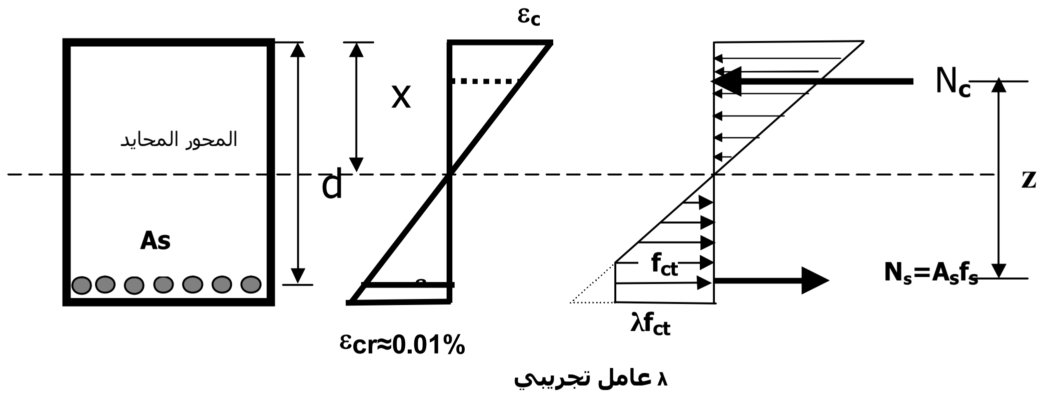


الشكل (3−2) نسب التسليح الأصغري كتابع لإجهاد خضوع الفولاذ من أجل الكود السوري والعلاقة

(2-3b)

3-3 دراسات تجريبية لجوائز مسلحة بأقل من النسبة الأصغرية وفق الكود العربي السوري [2]

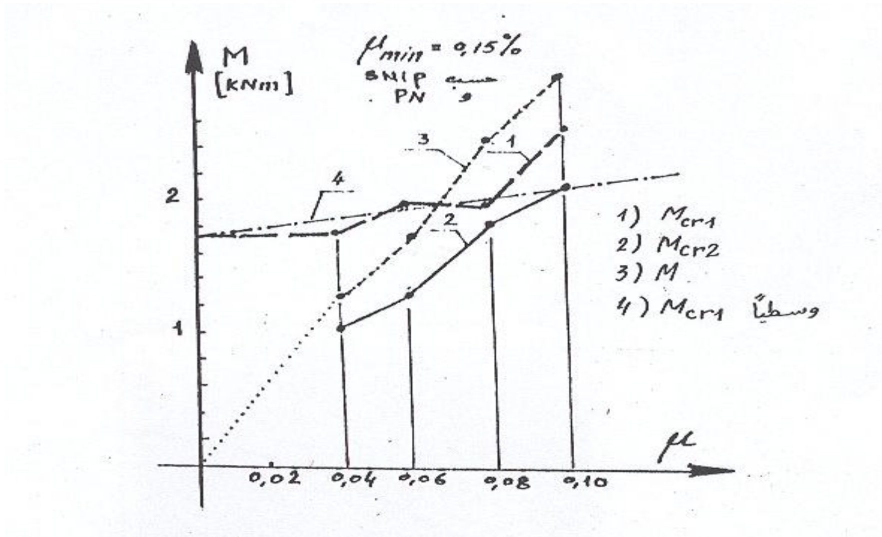
لقد ظهرت اقتراحات متباينة حول قضية التسليح الأقل من الحد الأصغري وذلك فيما يتعلق بمساهمة التسليح القليل في زيادة قدرة تحمل العناصر البيتونية والحالة الإجهادية في المقاطع العرضية في مرحلتي التشقق والانهيار. وقد اقترح دنبروفسكي [2] مخطط الإجهادات المبين في الشكل (3-3) من أجل المقاطع المستطيلة قليلة التسليح عندما $\mu < \mu_{min}$ بشكل خاص



الشكل (3-3) مخطط الإجهادات في المقاطع الخاضعة للانعطاف [2]

قدم دنبروفسكي علاقة مبسطة لحساب عزم التشقق M_{cr} تأخذ بالحسبان نسبة التسليح المستخدمة وتأثير أبعاد الجائز وشكل الحمولات المطبقة وجودة البيتون والتسليح وغير ذلك، كما اعتبر أن الوصول إلى حد مقاومة البيتون على الشد f_{ct} يعني انهيار الجائز عندما $\mu < \mu_{min}$ والملفت للانتباه أن دنبروفسكي ميّز في تجاربه ثلاثة قيم أساسية للعزوم.

- M_{cr1}: العزم الذي يسبق عملية التشقق مباشرة.
- M_{cr2}: العزم الذي يقاومه الجائز بعد التشقق مباشرة وهو عادة أقل من M_{cr1} بسبب خروج البيتون المتشقق عن العمل.
- M_k: العزم الذي يقاومه الجائز عند ثبات الحمولة المطبقة مخبرياً على مؤشر مكبس الضغط بالرغم من زيادتها، ويبين الشكل (3-4) تغير العزوم السابقة تبعاً لنسب التسليح المستخدمة.



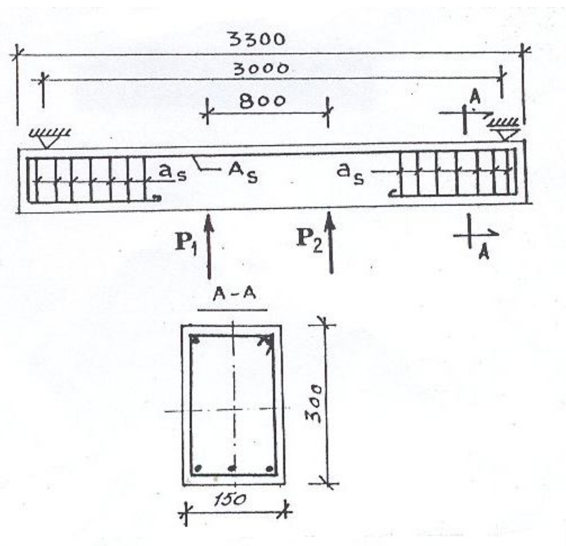
شكل(3−4) تغير العزوم المسببة للتشقق تبعاً لنسب التسليح في تجارب دنبروفسكي [2]

لم يكن من السهل إيضاح السلوك الفعلي للجوائز البيتونية المسلحة بتسليح أقل من الحد الأصغري باستخدام طرائق الاختبار العادية لأن هذه الجوائز كانت معرضة للانهيار مع وصول البيتون إلى حد المقاومة على الشد. وقد كانت هناك محاولات متعددة لدراسة سلوك العناصر البيتونية غير المسلحة في حالتي الشد والانعطاف بإجراء التجارب في شروط خاصة يتم فيها التحكم بالتشوهات . وقد قام معد البحث[2] بإجراء تجاربه الخاصة لإيضاح أداء الجوائز البيتونية المسلحة بأقل من الحد الأصغري حسب الكود السوري، وفيما يلي عرض مختصر لهذه التجارب والنتائج التي تمخضت عنها.

3−3−1 الاختبارات التجريبية

3−3−1−1 جوائز الاختبار

تم اختبار عدد من الجوائز البيتونية المسلحة بتسليح قليل حيث استخدمت قضبان تسليح فولاذية ملساء صغيرة القطر [mm]0.3-0.4-0.6وكان إجهاد الخضوع فيها مساوياً [MPa]250-270، وتعد نسب التسليح المستخدمة هنا أقل من الحد الأصغري المحدد وفق الكود السوري، وقد وزعت قضبان التسليح في منطقة الشد والضغط كما في الشكل (3−5) إذ تم الاستغناء عن تسليح الضغط والتسليح العرضي في الثلث الوسطي للجائز كي لا يكون سبباً مساعداً في تسريع عملية التشققات، وقد تم تحضير البيتون وصبه ومعالجته في شروط مخبرية عادية حيث تراوحت مقاومته المتوسطة على الضغط f_{cm} بحدود [MPa]20-30 وذلك لعينات أسطوانية 300×150 mm.



شكل (3−5) جوائز الاختبار وتوزيع التسليح فيها [2]

3−3−1−2 طريقة الاختبار ومراحل التحميل

يبين الشكل (3−6)رسماً تخطيطياً لمنصة الاختبار التي وفرت شروط التحكم بالتشوهات قبيل بدء عملية التشقق وفي مرحلتي التشقق والانهيار بفضل الصلابة الكافية لجملة التحميل في شروط الانتقالات القسرية، وهذا ما أتاح إمكانية الحصول على الاستمرارية المطلوبة للتجارب وتدوين القياسات المطلوبة، إذ لا يمكن تأمين ذلك في شروط الانتقالات العادية أي التحميل بالقوى فقط نظراً لقلة التسليح المستخدم.

تم إخضاع كمرة الاختبار لتأثير قوتين مركزتين P_1,P_2 موجهتين من الأسفل إلى الأعلى بواسطة رافعتين دورانيتين (12) وتم قياسهما باستخدام دينامومترين (10) متصلين بأجهزة قياس حساسة ذات دقة 0.05KN وتم قياس السهوم بدقة 0.01 mm وسعة تشققات بدقة 0.01 mm.

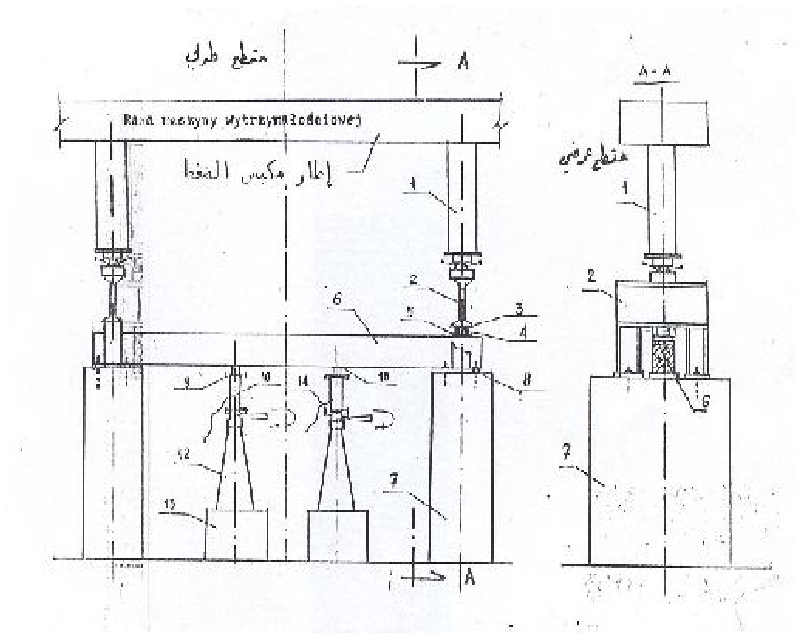
مرت كل تجربة بمرحلتي تحميل أساسيتين، الشكل (3−6) والشكل (3−7).

المرحلة الأولى: شملت الخطوات التالية:

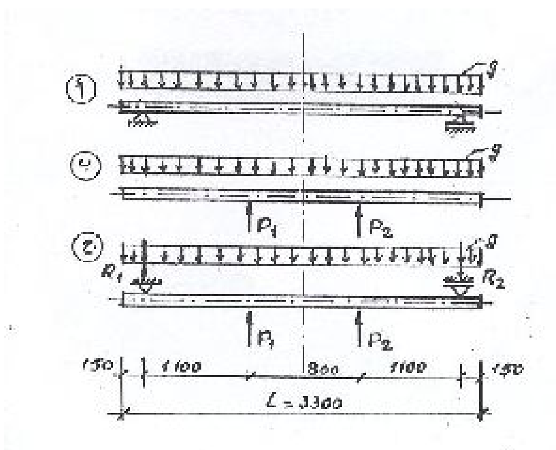
أ− إسناد الجوائز البيتونية على المساند رقم (7) والتأكد من دقة أجهزة القياس.

ب− رفع الجوائز عن المساند (7) بحيث يصبح مجموع القوتين P_1,P_2 مساوياً الوزن الذاتي للجائز، تم تسجيل التشوهات الناتجة على السطح العلوي المشدود ضمن مسافات قصيرة ومتجاورة.

ج- الضغط على المسندين الإطاريين (2) لتأمين الصلابة الكافية في المساند، ثم رفع الجائز إلى الأعلى حتى يستند طرفاها العلويان على الإطارين (2) وتسجيل قيم التشوهات المرافقة بعد تجاوز الحمولة المطبقة للوزن الذاتي بقليل وهي الحالة الصفرية.



الشكل (3-6) جملة التحميل المستخدمة [2]



الشكل (3-7) مراحل تحميل الجوائز [2]

المرحلة الثانية: تمثل فترة ما بعد الحالة الصفرية، إذ تمت زيادة الحمولة المطبقة بمعدل 1KN حتى اللحظة التي سبقت تشكل الشق الأول، واستمرت التجارب بعد ذلك عن طريق التحكم بالتشوهات وأخذ القياسات المرافقة مثل القوى، سعة التشققات وغير ذلك.

2-3-3 عزم الانعطاف المسبب للتشقق

يبدأ التشقق وفقاً للمفهوم التقليدي عند وصول الإجهادات الشادة في البيتون إلى حد المقاومة على الشد ويترافق ذلك بحدوث انقطاع على مخطط العزم ـ السهم تبعاً لكمية التسليح المستخدمة، ويمكن الحصول على تشوهات مستمرة بفضل شروط الانتقالات القسرية، وهذا ما تأكده التجارب المشار إليه أعلاه.

لقد أمكن التميز بين ثلاثة قيم رئيسية للعزوم المرتبطة بحصول عملية التشقق وهي:

M_{cr}^{z} : عزم الانعطاف الذي يمكن عنده توقع مكان ظهور الشق الأول.

M_{cr}^{m} : عزم الانعطاف الأقصى الذي يمكن تسجيله قبل ظهور الشق الأول مباشرة.

M_{cr}^{0} : عزم الانعطاف الذي يمكن تسجيله عند رؤية الشق الأول.

الجوائز / العزوم	B1(1)	B1(2)	B1(3)	B2(1)	B2(2)	B2(3)	B3(1)	B3(2)	B3(3)	B4(1)	B4(2)	B4(3)	B5(1)	B5(2)	B5(3)
M_{cr}^{z}	3.5	3.4	3.4	3.4	3.4	3.3	3.5	3.5	4.0	5.1	5.5	4.8	4.8	4.9	4.9
M_{cr}^{m}	3.8	3.4	3.9	4.7	4.2	4.4	4.4	4.8	4.9	6.5	6.7	6.7	7.2	7.7	7.1
M_{cr}^{0}	3.2	3.3	3.3	3.7	3.9	3.4	3.4	3.3	3.5	6.1	6.6	6.6	6.5	6.7	6.9
%μ	0			0.05			0.09			0.2			0.27		
f_{ctm} [MPa]	0			1.95			1.9			1.95			2.0		

جدول (3-3) عزم التشقق في الجوائز المختبرة [KN.m] [2]

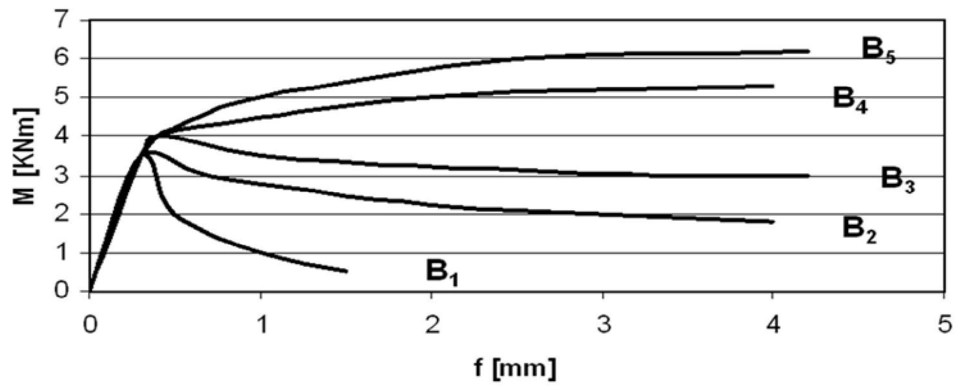
بملاحظة الجدول (3-3) نجد أن قيم M_{cr}^{0} أقل بشكل عام من قيم M_{cr}^{m} و أكبر من قيم M_{cr}^{z} وهذا طبيعي بالنظر لتحرر قسم من الطاقة المختزنة أصلاً في البيتون نتيجة تشكل التشققات، ويظهر ذلك على المنحنيات التي تصف علاقة العزم- السهم، وقد تبين أيضا أن قيم M_{cr}^{m} أكبر من القيم المماثلة لها في الكمرات غير المسلحة.

3-3-3 التشقق والانهيار

يظهر الشكل (3-8) الملامح العامة لمنحنيات العلاقة بين عزوم الانعطاف M والسهوم f، ومن الواضح أن تأثير نسبة التسليح المستخدمة كبير جداً على عملية التشقق وطبيعة انهيار الجوائز المختبرة .

في الجوائز المسلحة بنسب تسليح μ_1=0.05;0.1% لوحظ هبوط كبير في قيم عزوم الانعطاف ترافقت مع تزايد سريع في قيم السهوم، ثم أخذ العزم يتغير ببطء شديد مع استمرار تزايد السهوم 15[mm]، وترافق ذلك مع ازدياد نسبي في سعة التشققات وصل إلى بعض ميليمترات عند الطرف المشدود، ويعني ذلك أن عزم الانعطف أصبح تابعاً لتغير ذراع المزدوجة الداخلية في الجائز المختبر .وبعد فترة وجيزة أخذت عزوم الانعطاف بالتزايد من جديد نتيجة لتزايد الإجهادات في التسليح، إذ أصبحت أكبر من إجهاد الخضوع f_y، ويمكن تفسير ذلك على أساس ظاهرة التصلب الذاتي للفولاذ التي تحدث على امتداد مسافة ضيقة بجوار الشق بفضل امتصاص البيتون العامل على الشد في هذه المنطقة الفائض من الإجهادات وبحيث يمكن وصول الإجهادات إلى قيمة أكبر من مقاومة الفولاذ على الانقطاع.

في الجوائز المسلحة بنسب μ_2= 0.2% ; 0.27% كان الأداء مشابهاً لأداء الجوائز ذات التسليح العادي، وكان عزم الانعطاف بشكل عام تابعاً متزايداً للسهوم واتساع التشققات وبقيت العزوم أكبر من عزم التشقق M_{cr}^{m} وكان عدد التشققات المتشكلة أكثر وحجمها أقل مما حدث في الجوائز ذات النسب μ_1 . وبعد استقرار عملية التشقق استمر شق واحد أو اثنان بالاتساع والعمق في جسد الجائز مع توقف وانغلاق التشققات الأخرى حتى حصول الانكسار، وتصبح علاقة العزم – السهم متعلقة بمواقع المقاطع ذات التشققات الأكثر اتساعاً .



الشكل (3-8) تغير العزوم والسهوم تجريبياً [2]

نستنتج مما سبق بأن أداء الجوائز البيتونية المسلحة بنسبة μ_2=0.2;0.27% عند اختبارها في شروط الانتقالات القسرية تشبه أداء الجوائز ذات التسليح الأكبر من الحد الأصغري المحدد في الكود العربي السوري لذلك فقد كان من الضروري إعادة النظر بطريقة تحديد نسبة التسليح الأصغري في الجوائز البيتونية المسلحة في الكود العربي السوري لجهة تخفيض هذه النسبة بهدف الإقلال من الهدر في استهلاك الفولاذ .

3-4 الخلاصة:

تم في هذا الفصل المقارنة بين قيم النسبة الأصغرية للتسليح وفقاً لعلاقات المبدأ الأساسي الذي تم شرحه في الفصل السابق وعلاقة الكود العربي السوري، كما تم استعراض أداء الجوائز البيتونية المسلحة بأقل من الحد الأصغري الذي يحدده الكود العربي السوري ، وذلك من خلال اعتماد اختبارات تجريبية تمت في شروط تحميل خاصة هي شروط الانتقالات القسرية والتي تم إجراؤها في وقت سابق.

كان الهدف من هذا الفصل بيان أنه بالإمكان تخفيض الحد الذي يفرضه الكود العربي السوري على النسبة الأصغرية للتسليح، سواء من خلال نتائج المقارنة مع علاقات المبدأ الأساسي لحساب النسبة الأصغرية للتسليح، أو من خلال عرض نتائج تجريبية تمت ضمن هذا الإطار. الأمر الذي يستدعي البحث في العوامل التي تؤثر على قيمة النسبة الأصغرية للتسليح حتى يتم أخذها في الحسبان، وهذا ما سيتم نقاشه في الفصل القادم.

الفصل الرابع
CHAPTER FOUR

العوامل المؤثرة بنسبة التسليح الأصغرية
PARAMETERS INFLUENCE THE MINIMUM RINFORCEMENT RATIO

1-4 مقدمة

يرمي هذا الفصل إلى إيجاد المنحنيات التي تعكس بشكل دقيق العلاقة بين القوة والانتقال للجوائز البيتونية المسلحة بتسليح قليل، بهدف تحديد العوامل التي لها تأثير على استقرار الانهيار نتيجة الشد.

في حال كانت قوة الخضوع للجائز F_y أكبر من القوة العظمى التي يتشقق عندها البيتون F_t، يعتبر الانهيار نتيجة الشد لدناً ومستقراً، لذا يعتبر تحديد القوة العظمى التي توافق انهيار البيتون نتيجة الشد أمراً أساسياً في التحليل، وبما أن هذه الأنواع من الانهيارات يتحكم بها تأثيرات ميكانيكية الانكسار لذلك يجب اعتماد منهج الانكسار الميكانيكي (Fracture Mechanical approach) حتى نتمكن من تحديد نسبة دقيقة لـ F_t/F_y لأحجام مختلفة من العناصر وبالتالي نتمكن من تحديد نسبة التسليح الأصغرية اللازمة.

سيتم في هذا الفصل توضيح المبادئ الأساسية للنموذج المستخدم في الدراسة مع الحالات التي تم دراستها ومن ثم سيتم عرض النتائج التي تم الوصول إليها.

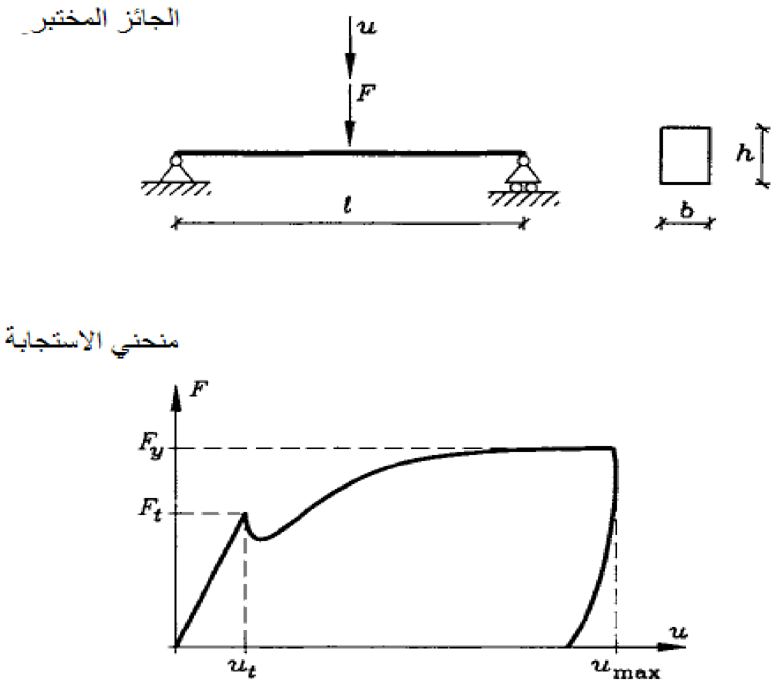
2-4 أساسيات النموذج المعتمد في الدراسة [6]

سيتم فقط عرض أساسيات النموذج المعتمد لدراسة جوائز بيتونية بسيطة الاستناد مع حمولة في منتصفها شكل(4-1)، حيث:

- يتم الافتراض أن الشق يبدأ بالتشكل والاتساع عند منتصف الجائز ومنطقة الانهيار توافق المنطقة الواقعة أعلى الشق.

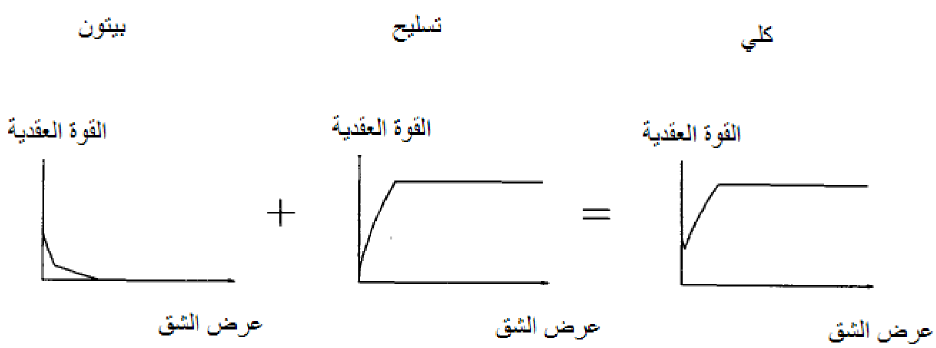
- إن النقاط الواقعة على الخط الذي يتسع وفقه الشق ستكون بإحدى الحالات التالية بحسب (fictitious crack model):
  - إما في الحالة المرنة.
  - أو في حالة الانهيار التي تبدأ فيها مقاومة المادة بالانخفاض نتيجة الشقوق الصغيرة جداً.
  - أو في حالة التشقق التام حيث تنعدم الإجهادات المنقولة بين طرفي الشق عند هذه النقطة.

- تم تقسيم المقطع عند منتصف الجائز إلى مجموعة عقد، وتم تحديد العلاقة بين القوة العقدية وعرض الشق.



الشكل (4−1) الجائز المدروس ومنحني الاستجابة الموافق [6].

- إن العقد الواقعة في مكان التسليح يجب أن تمثل كلاً من التسليح والبيتون، بحيث أن العلاقة بين القوة العقدية وعرض الشق تحسب من تراكب مساهمة البيتون ومساهمة التسليح كما هو موضح بالشكل (4−2).



الشكل (4−2) العلاقة بين القوة وعرض الشق للعقد التي تمثل البيتون والتسليح [6].

- إن التماسك والانزلاق بين قضبان التسليح والبيتون يؤثر بشكل كبير على استجابة الجائز، لذلك تم أخذه بعين الاعتبار في هذا النموذج بحيث تم الافتراض أن إجهادات التماسك ثابتة بين قضبان التسليح والبيتون في منطقة الانزلاق.

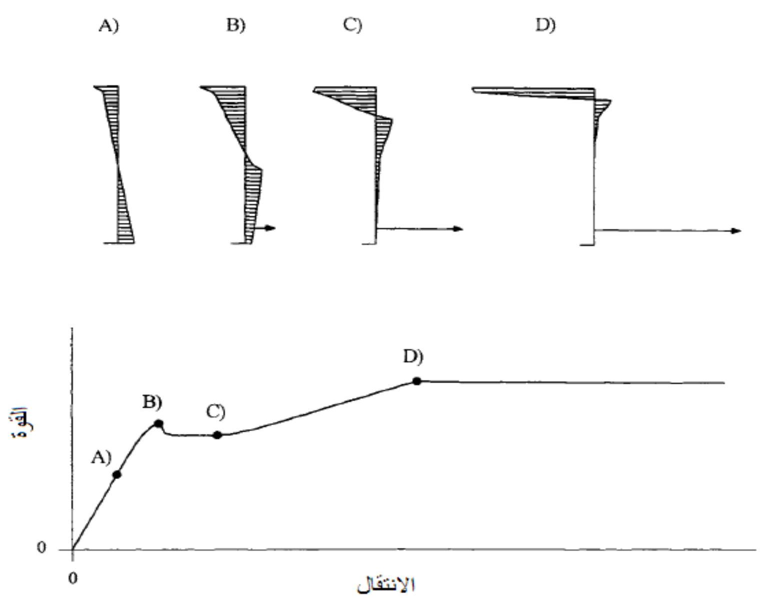
- لتبسيط المسألة تم اعتبار أن القوة الناتجة في التسليح تعمل عند وجهي الشق للبيتون المشدود.

في الشكل(4-3) تم اعتماد الأساسيات السابقة في إيجاد منحني الاستجابة الذي يوضح العلاقة بين القوة والانتقال عند منتصف الجائز مع مخططات توزع الإجهادات عند نقاط محدد من هذا المنحني وبملاحظة هذا الشكل نجد ما يلي:

- يسلك الجائز سلوكاً مرناً حتى النقطة A التي توافق وصول إجهاد الشد عند الطرف المشدود من الجائز إلى القيمة التي يتحملها البيتون على الشد.

- تبدأ الشقوق بالاتساع وكون عرضها صغير في هذه المرحلة نجد أن هناك توزع شبه لدن للإجهادات في المنطقة المشدودة من الجائز، هذا الأمر يؤدي إلى زيادة الحمولة حتى تصل إلى القيمة التي يحدث عندها أول شق عند النقطة B وتدعى القوة عند الذروة (peak load).

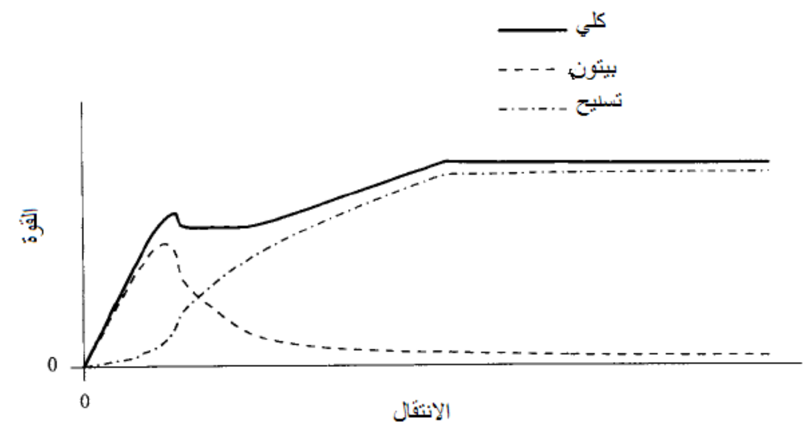
- عند النقطة C يصبح عرض الشق أسفل الجائز مساوياً إلى عرض الشق الحدي، عندها تزداد مساهمة التسليح في القوة التي يتحملها الجائز ومع استمرار اتساع الشق تزداد القوة بشكل سريع حتى الوصول إلى إجهاد الخضوع للتسليح عند النقطة D.



الشكل (4-3) منحني قوة – انتقال مقسم إلى عدة أجزاء حسب مخططات توزع الإجهادات المأخوذة [6].

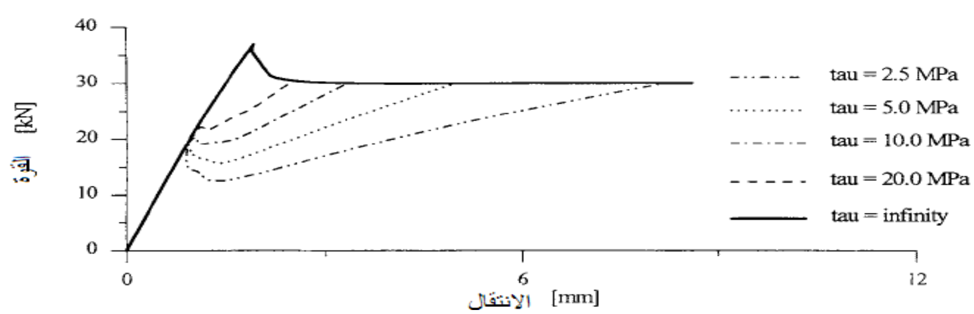
إن الهبوط الحاصل بين القوة عند الذروة الموافقة لتشكل أول شق والاستقامة الناتجة عن خضوع التسليح هي أحد مميزات الاستجابة للجوائز المسلحة بتسليح قليل.

في أي مرحلة من مراحل الاستجابة السابقة يمكن تقسيم الحمولة التي يتحملها الجائز إلى مساهمة من البيتون ومساهمة من التسليح كما هو موضح في الشكل (4-4)، حيث يتم ملاحظة أنه عند الانتقالات الصغيرة فإن البيتون هو من يتحمل القوة، في حين أنه من أجل الانتقالات الكبيرة فإن التسليح هو الذي يتحمل القوة المطبقة.



الشكل(4-4) منحني قوة – الانتقال مقسم إلى مساهمة من البيتون والتسليح [6].

إن التماسك والانزلاق الحاصل على السطح المشترك بين البيتون والتسليح له تأثير كبير على سلوك الانهيار للجائز بعد بلوغ القوة عند الذروة (peak load)، ولتوضيح ذلك تم رسم منحنيات قوة – انتقال لجائز أبعاده 200×400×2400 mm، حيث تم أخذ قيم تتراوح بين 2.5MPa و اللانهاية لـ τ_f إجهاد القص الاحتكاكي (shear friction stress) الشكل (4-4) وهي ثابتة على السطح المشترك بين البيتون والتسليح والذي يحصل عنده الانزلاق كما ذكرنا سابقاً .



الشكل (4-5) منحنيات قوة –انتقال لجائز من البيتون العادي نسبة التسليح فيه 0.25% وأبعاده 200×400×2400 mm وإجهاد القص الاحتكاكي متغير من 2.5MPa وحتى اللانهاية [6].

يتضح من الشكل (4−5) أن لإجهاد القص الاحتكاكي تأثير كبير على سلوك الجائز في المنطقة الواقعة بين القوة عند الذروة الموافقة لتشكل أول شق وبين الاستقامة الناتجة عن خضوع التسليح، بحيث كلما قلت قيمة إجهاد القص الاحتكاكي كلما كان الانتقال (deflection) الموافق لخضوع التسليح أكبر. كذلك نلاحظ من الشكل أن المنحني الموافق لقيمة إجهاد قص احتكاكي يسعى للانهاية $\tau_f \rightarrow \infty$ يمثل المنحني السيد (master curve) فكل المنحنيات الباقية الموافقة للقيم الأخرى لـ τ_f تنطلق منه وتعود إليه.

سيتم في هذا النموذج دراسة جوائز بيتونية معرضة لحمولة في منتصفها من أجل إيجاد منحني الاستجابة لها شكل (4−1) بحيث سيتم أخذ عدة نسب للتسليح من أجل كل جائز واعتبار أن نسبة التسليح الأصغرية المناسبة له هي التي تجعل من F_y القوة التي تثبت عندها استجابة الجائز بعد خضوع التسليح مساوية للقوة التي يحدث عندها الشق الأول F_t، أي أننا نحصل على نسبة التسليح الأصغرية عندما يكون $F_t / F_y = 1$. وفيما يلي سيتم توضيح مواصفات الجوائز التي تم تحديد نسب التسليح الأصغرية لها من أجل معرفة ما هي العوامل التي تؤثر على قيمة النسبة الأصغرية للتسليح.

4−3 الحالات المدروسة

إن نسب التسليح الأصغرية التي تم إيجادها كانت من أجل الحالات التالية:

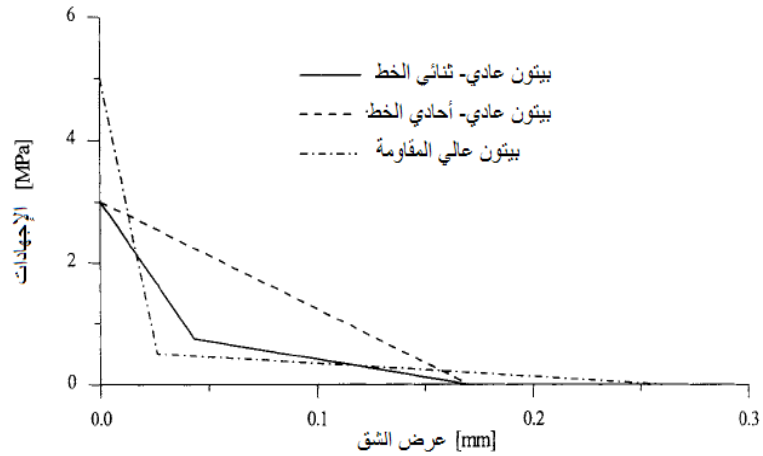
- تم استخدام الأنواع التالية من البيتون الشكل (4−6):

- بيتون عادي المقاومة مع علاقة لانخفاض التحمل (softening relation) إحادية الخط مع طاقة انكسار مساوية لـ $2G_f$.

إن علاقة انخفاض التحمل (softening relation) هي علاقة بين عرض الشق وقيمة إجهاد الشد الذي يتحمله البيتون عند هذا العرض، ويجب الإشارة هنا أن قيمة طاقة الانكسار G_f تؤخذ مساوية إلى المساحة المحصور تحت المنحني الذي يعبر عن هذه العلاقة.

- بيتون عادي المقاومة مع علاقة لانخفاض التحمل (softening relation) ثنائية الخط مع طاقة انكسار مساوية لـ G_f.

- بيتون عالي المقاومة مع علاقة لانخفاض التحمل (softening relation) ثنائية الخط مع طاقة انكسار مساوية لـ G_f.



الشكل (4−6) علاقات انخفاض التحمل لأنواع البيتون المستخدمة في النموذج [6].

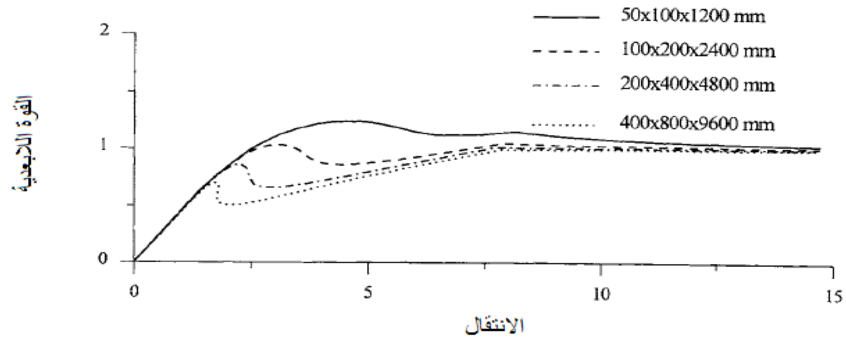
ويوضح الجدول (4−1) تحمل البيبون على الشد f_t، معامل يونغ E وطاقة الانكسار G_f للأنواع السابقة.

الخواص	بيتون عادي المقاومة مع علاقة أحادية الخط	بيتون عادي المقاومة مع علاقة ثنائية الخط	بيتون عالي المقاومة مع علاقة ثنائية الخط
f_t [MPa]	3.0	3.0	5.0
E [Mpa]	40,000	40,000	40,000
G_f [N/mm]	0.240	0.120	0.120

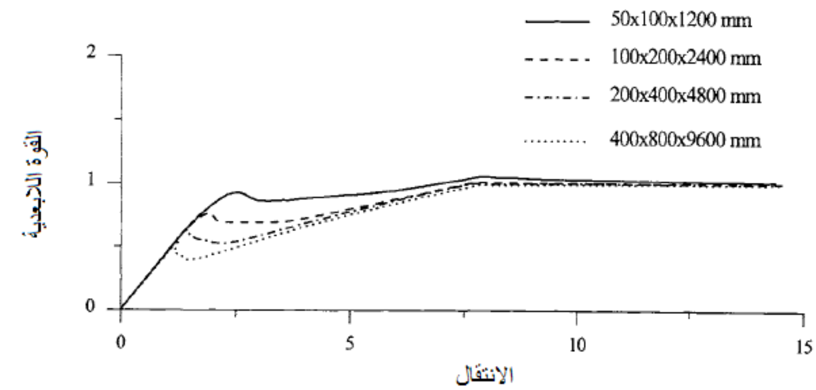
الجدول (4−1)خواص البيتون المستخدم في الدراسة [6].

- تم أخذ القيم التالية للارتفاعات 100, 200, 400, 800 mm، وأُخذ عرض المقطع مساوياً لنصف الارتفاع أي أن b/h=0.5، أما النحافة فكانت l/h=12.
- إن قيم إجهاد القص الاحتكاكي تُؤخذ ضمن المجال 3-8 MPa، في النموذج تم أخذ القيمة 5 [MPa].
- قيمة إجهاد الخضوع للقضبان أُخذت مساوية لـ 500 [MPa].
- تم من أجل جميع الجوائز إيجاد نسبة التسليح الأصغرية المناسبة للحالتين التاليتين:
  - حالة جائز لا يحوي شقوق ابتدائية.
  - حالة جائز يحوي شقوق ابتدائية عمقها 7.5% من ارتفاع الجائز.

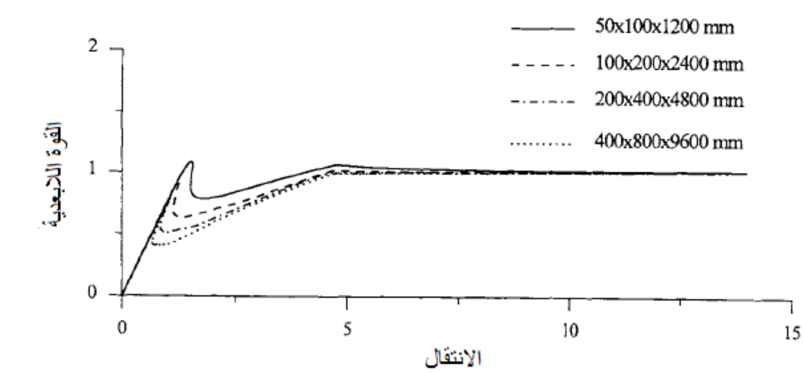
إن الشكل(4–7) يوضح منحنيات الاستجابة لجوائز مسلحة بنسبة تسليح مساوية لـ 0.25% مع الأخذ بعين الاعتبار أساسيات النموذج التي تم ذكرها سابقاً .



(أ) بيتون عادي المقاومة مع علاقة أحادية الخط لانخفاض التحمل.



(ب) بيتون عادي المقاومة مع علاقة ثنائية الخط لانخفاض التحمل.



(جـ) بيتون عالي المقاومة مع علاقة ثنائية الخط لانخفاض التحمل.

الشكل (4–7) منحنيات استجابة الجوائز بالأبعاد المختارة مع نسبة تسليح 25% [6].

نلاحظ من الشكل(4-7) كيف أن الاستجابة تتغير بتغير الارتفاع حيث تنقص قيمة القوة F_t التي يتشكل عندها أول شق مع زيادة الارتفاع من أجل البيتون عادي وعالي المقاومة، ومن أجل الارتفاع نفسه تكون F_t من أجل بيتون عادي بعلاقة أحادية الخط لانخفاض التحمل ($2G_f$) أكبر من F_t لبيتون عادي بعلاقة ثنائية الخط لانخفاض التحمل (G_f)، وبالتالي فإن الانهيار يصبح أكثر استقراراً كلما قلت قيمة طاقة الانكسار. أيضا نلاحظ أن F_t لمنحنيات الاستجابة لبيتون عالي المقاومة أكبر من F_t لمنحنيات الاستجابة لبيتون عادي المقاومة، وبالتالي الانهيار يصبح أكثر هشاشة مع زيادة مقاومة البيتون .

إن تأثير الارتفاع واضح وقوي على الاستجابة كما هو واضح في الشكل(4-7) فمن أجل نسبة معينة للتسليح نجد بأن النسبة F_t / F_y تقل عندما يزداد ارتفاع الجائز، وحتى تبقى قيمة النسبة F_t / F_y هي نفسها عندما يزداد الارتفاع يجب أن نخفض نسبة التسليح الموضوعة.

4-4 نتائج الدراسة:

يبين الشكل (4-8) قيم نسب التسليح الأصغرية لجميع الجوائز المدروسة التي تم تحديدها انطلاقاً من تحقيق الشرط التالي:

$$F_y = F_t$$

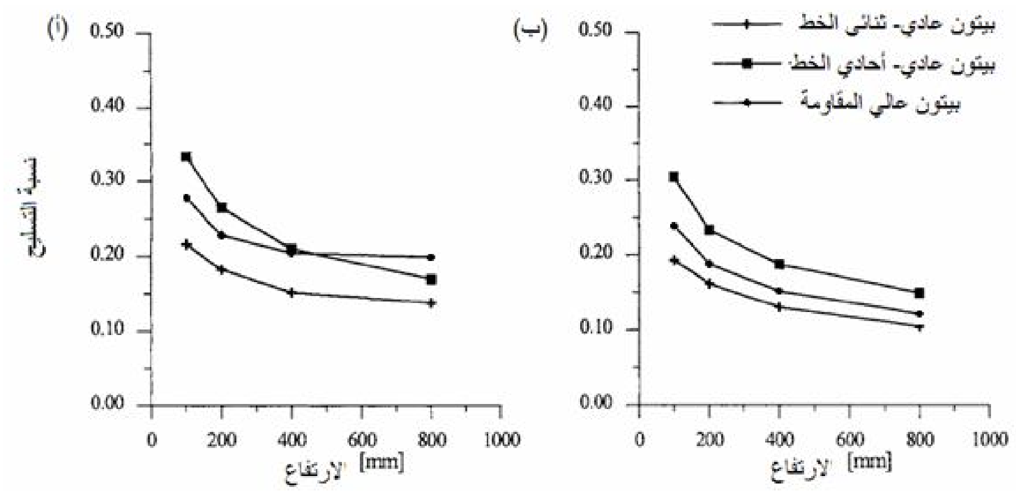
حيث:

F_t هي القوة التي يحدث عندها أول شق على منحني الاستجابة قوة – انتقال.

F_y هي القوة التي تثبت عندها استجابة الجائز بعد خضوع التسليح.

كما يظهر من الشكل (4-8) فإن نسبة التسليح الموافقة لـ $F_y = F_t$ تعتمد بشكل واضح على ارتفاع الجائز و شكل علاقة انخفاض التحمل (softening relation). إن نسب التسليح الأصغرية من أجل التسليح المستخدم واقعة في المجال 0.20-0.35% من أجل الجوائز الصغيرة جداً ذات الارتفاع 100 mm، في حين أن هذا المجال يتقلص إلى 0.10-0.20% من أجل الجوائز الكبيرة ذات الارتفاع 800 mm. وأيضاً كما هو متوقع فأن نسبة التسليح الأصغرية من أجل بيتون عالي المقاومة أعلى من نسبة التسليح الأصغرية لبيتون عادي المقاومة، كذلك كلما كان منحني علاقة انخفاض التحمل (softening relation) يحصر مساحة أكبر كلما كانت نسبة التسليح الأصغرية اللازمة أكبر، وبمعنى آخر كلما كانت الطاقة المتحررة من الانكسار أكبر كلما كانت نسبة

التسليح الأصغرية اللازمة أكبر. كذلك يمكن أن نلاحظ من الشكل (4-8- ب) أنه في حال وجود شقوق ابتدائية فإن نسبة التسليح الأصغرية تقل، ويصبح تأثير الارتفاع أوضح.



الشكل (4-8) نسب التسليح الأصغرية لجوائز بأبعاد مختلفة مع علاقات لانخفاض التحمل مختلفة [6] (softening relation)

(أ) حالة جوائز لا تحوي شقوق ابتدائية، (ب) حالة جوائز تحوي شقوق بنسبة 7.5% من ارتفاع الجائز.

مما سبق يمكننا الوصول إلى النتائج التالية:

1. إن قيم نسبة التسليح الأصغرية تقل مع ازدياد ارتفاع الجائز.

2. إن قيم نسبة التسليح الأصغرية للبيتون عالي المقاومة أكبر من قيم نسبة التسليح الأصغرية لبيتون عادي المقاومة عندما تكون علاقة انخفاض التحمل (softening relation) لكليهما ثنائية الخط ويحصران نفس المساحة أي لهما نفس قيمة الطاقة المتحررة.

3. إن قيم نسبة التسليح الأصغرية لبيتون عادي المقاومة علاقة انخفاض التحمل له ثنائية الخط أصغر من قيم نسبة التسليح الأصغرية لبيتون عادي المقاومة علاقة انخفاض التحمل له أحادية الخط (له ضعف قيمة طاقة الانكسار).

4. إن قيم نسبة التسليح الأصغرية في حالة وجود شقوق ابتدائية أصغر من قيم نسبة التسليح الأصغرية في حالة عدم وجود شقوق ابتدائية.

مما سبق نستنتج أن نسبة التسليح الأصغرية μ_{min} يؤثر في تحديدها عدة عوامل عديدة مثل:

- ارتفاع الجائز.
- نوع البيتون .
- شكل علاقة انخفاض التحمل (softening relation).
- حالة الجائز إذا حوى تشققات أم لم يحو.

الأمر الذي يؤكد ضرورة إعادة النظر بعلاقات الكودات وا إيجاد علاقات جديدة تأخذ بعين الاعتبار العوامل السابقة حتى نقلل من الهدر الحاصل في التسليح.

5-4 الخلاصة:

في هذا الفصل تم اعتماد منحني استجابة الجائز قوة- انتقال من أجل تحديد نسبة التسليح الأصغرية انطلاقاً من تحقيق شرط تساوي القوة التي يتشقق عندها البيتون مع القوة التي يخضع عندها التسليح. ومن خلال أخذ جوائز عديدة تختلف عن بعضها بالارتفاع، مقاومة البيتون على الضغط، شكل علاقة انخفاض التحمل (softening relation)وأخيراً وجود أو عدم وجود شقوق ابتدائية أمكن معرفة كيف تؤثر هذه العوامل على قيمة نسبة التسليح الأصغرية.

نهدف من هذا الفصل تأمين مدخل للفصل القادم الذي سيتم فيه توضيح لبعض نماذج نظرية توصل الباحثين من خلالها إلى علاقات لحساب نسبة التسليح الأصغرية تأخذ بعين الاعتبار العوامل التي أمكن الوصول إليها في هذا الفصل.

الفصل الخامس
CHAPTER FIVE

نماذج نظرية محددة لنسب تسليح أصغرية
THEORETICAL MODELS ESTIMATE MINIMUM REINFORCEMENT RATIOS

1-5 مقدمة

رأينا في الفصل السابق أن هناك عدة عوامل تؤثر على قيمة النسبة الأصغرية للتسليح. إن العلاقات التي تعتمدها الكودات لحساب النسبة الأصغرية للتسليح – تم عرضها ونقاشها في الفصل الثاني– تأخذ بعين الاعتبار بعض هذه العوامل مما أدى في بعض الأحيان إلى فرض قيم لهذه النسبة أعلى مما هو مطلوب، لذلك عمد عدد من الباحثين إلى إيجاد نماذج نظرية مختلفة توصلوا من خلالها إلى علاقات جديدة مع عوامل جديدة لحساب نسبة التسليح الأصغرية، حيث ساهم بعض هذه العوامل في تخفيض هذه النسبة كارتفاع الجائز مثلاً .

سنقوم في هذا الفصل بتوضيح نموذجين أحدهما يعتمد ميكانيكية انكسار خطي مرن (LFEM)، والآخر يعتمد الطول الفعّال للانزلاق (Effective slip-length)، حيث سنقوم بشرح الأساسيات النظرية التي يعتمدها كل نموذج مع العلاقات والمنحنيات الخاصة به، كذلك سنقوم بمناقشة قيم نسب التسليح الأصغرية وفق كل نموذج.

5–2 النموذج الأول: نموذج الانكسار الميكانيكي الخطي المرن [8]

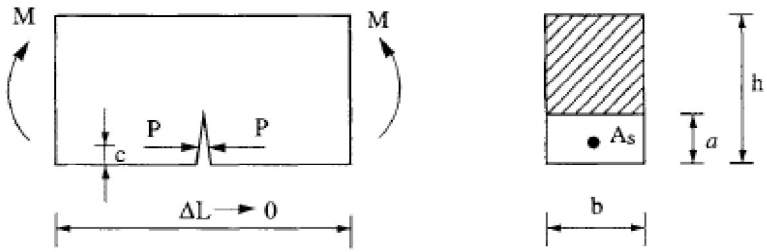
5–2–1 أساسيات النموذج

Carpinter, bosco [1993] يفترض النموذج عدة فرضيات تتركز بما يلي:

- اعتماد ميكانيكية الانكسار الخطي المرن (Linear Elastic Fracture Mechanics) وبالتالي يمكن حساب التشوهات من خلال تراكب خطي للتشوهات الناتجة عن القوى والعزوم المطبقة .
- اعتبار أن القوة الناتجة في التسليح للعنصر المعرض للانعطاف مطبقة عند وجهي الشق مباشرة في مكان توضع التسليح.
- افتراض أن التسليح يخضع عند وصول الشق إلى مستوى التسليح.

5–2–2 حساب التشوهات لعنصر متشقق

إن حساب التشوهات الكلية لعنصر متشقق يخضع لأكثر من حمولة في وقت واحد مع اعتبار أنه يتصرف بشكل مرن يتطلب جمع آثار لحساب التشوهات.



الشكل (5–1) العنصر المتشقق [8].

إن العنصر المتشقق الموضح بالشكل (5–1) خاضع بنفس الوقت إلى عزم انعطاف M و قوة P المطبقة عند وجهي الشق، ينتج عن القوة P كل من التشوه الزاوي $\Delta\phi_{MP}$ و الانتقال $\Delta\delta_{PP}$ الناتج عن انفتاح الشق عند نقطة تطبيق القوة P، كذلك فإن العزم M يسبب التشوه الزاوي $\Delta\phi_{MM}$ إضافة إلى الانتقال $\Delta\delta_{PM}$ الناتج عن انفتاح الشق نتيجة عزم الانعطاف M عند نقطة تطبيق القوة P.

من خلال تراكب خطي يمكن أن نكتب:

$$\Delta\delta = \Delta\delta_{PM} + \Delta\delta_{PP} = \lambda_{PM}M - \lambda_{PP}P \qquad (5-1)$$

$$\Delta\phi = \Delta\phi_{MM} + \Delta\phi_{MP} = \lambda_{MM}M - \lambda_{MP}P \qquad (5-2)$$

حيث العوامل $\lambda_{MM}, \lambda_{PM}, \lambda_{MP}, \lambda_{PP}$ هي مطاوعات العنصر وتتوقف على الشق الموجود بحيث:

λ_{PP} عرض الشق الناتج عن قوةP=1.

λ_{PM} عرض الشق الناتج عن عزم M=1 .

λ_{MP} الدوران الناتج عن قوة P=1.

λ_{MM} الدوران الناتج عن عزم M=1.

ولحساب هذه المطاوعات سننطلق أولاً من علاقة تغير الطاقة الكامنة الكلية التي تُعطى بالشكل:

$$\Delta W = \int_0^c \mathcal{G}_M b\,\mathrm{d}x + \int_c^a \mathcal{G}_{(M+P)} b\,\mathrm{d}x = \int_0^c \frac{K_{IM}^2}{E} b\,\mathrm{d}x + \int_c^a \frac{(K_{IM}+K_{IP})^2}{E} b\,\mathrm{d}x =$$

$$= \int_0^c \frac{K_{IM}^2}{E} b\,\mathrm{d}x + \int_c^a \frac{K_{IM}^2}{E} b\,\mathrm{d}x + \int_c^a \frac{K_{IP}^2}{E} b\,\mathrm{d}x + 2\int_c^a \frac{K_{IM}K_{IP}}{E} b\,\mathrm{d}x = \qquad (5\text{-}3)$$

$$= \int_0^a \frac{K_{IM}^2}{E} b\,\mathrm{d}x + \int_c^a \frac{K_{IP}^2}{E} b\,\mathrm{d}x + 2\int_c^a \frac{K_{IM}K_{IP}}{E} b\,\mathrm{d}x$$

حيث:

ΔW تغير الطاقة الكامنة الكلية.

G_M الطاقة المتحررة من التشوه.

E معامل يونغ للمادة.

K_{1M} معامل شدة الإجهاد نتيجة العزم M .

K_{1P} معامل شدة الإجهاد نتيجة القوة P .

وباستخدام نظرية كلابيرون، من الممكن أن نكتب:

$$\Delta W = \frac{1}{2} M\Delta\phi_{MM} + \frac{1}{2} P\Delta\delta_{PP} + \frac{1}{2}(P\Delta\delta_{PM} + M\Delta\phi_{MP}). \qquad (5\text{-}4)$$

وبالاستفادة من نظرية بيتي التي مفادها أن:

$$P\Delta\delta_{PM} = M\Delta\phi_{MP}$$

من مطابقة المعادلتين (3-5) و (4-5) نحصل على ما يلي:

$$\frac{1}{2} M\Delta\phi_{MM} = \int_0^a \frac{K_{IM}^2}{E} b\,\mathrm{d}x \qquad (5\text{-}5)$$

$$\frac{1}{2} P\Delta\delta_{PP} = \int_c^a \frac{K_{IP}^2}{E} b\,\mathrm{d}x \qquad (5\text{-}6)$$

$$P\Delta\delta_{PM} = M\Delta\phi_{MP} = 2\int_c^a \frac{K_{IM}K_{IP}}{E} b\,\mathrm{d}x. \qquad (5\text{-}7)$$

إن معامل شدة الإجهاد الناتج عند أعلى الشق نتيجة العزم M يمكن أن يعبر عنه كما يلي:

$$K_{IM} = \frac{M}{h^{3/2}b} Y_M(\xi) \tag{5- 8}$$

حيث ξ=a/h ويدعى عمق الشق النسبي (relative crack depth) .

في حين أن معامل الإجهاد الناتج عن القوة المطبقة P عند مستوى التسليح هو:

$$K_{IP} = \frac{2P/b}{\sqrt{\pi a}} F(\frac{c}{a}, \xi). \tag{5- 9}$$

إن العلاقة (5-9) يمكن أن نكتب بالشكل:

$$K_{IP} = \frac{P}{h^{1/2}b} Y_P(\frac{c}{h}, \xi) \tag{5- 10}$$

حيث:

$$Y_P(\frac{c}{h}, \xi) = F(\frac{c}{a}, \xi) \frac{2}{\sqrt{\pi \xi}}. \tag{5- 11}$$

باعتبار أن $\xi = a/h \le 0.7$ فإن التابع $Y_M(\xi)$ في المعادلة (5-8) يعطى كالتالي

$$Y_M(\xi) = 6 \times (1.99\xi^{1/2} - 2.47\xi^{3/2} + 12.97\xi^{5/2} - 23.17\xi^{7/2} + 24.80\xi^{9/2}) \tag{5- 12}$$

باعتبار أن a/h < 1, c/a <1 فإن التابع $F\left(\frac{c}{a}, \xi\right)$ في المعادلة (5-9) يعطى كما يلي:

$$F(\frac{c}{a}, \xi) = \frac{3.52(1 - c/a)}{(1 - \xi)^{3/2}} - \frac{4.35 - 5.28c/a}{(1 - \xi)^{3/2}} + \left[\frac{1.30 - 0.30(c/a)^{3/2}}{(1 - (c/a)^2)^{-1/2}} + 0.83 - 1.76c/a\right] [1 - (1 - c/a)] \tag{5- 13}$$

بتعويض المعادلة (5-8) بالمعادلة (5-5) وتقسيمها على M^2 نحصل على عامل المطاوعة λ_{MM}:

$$\lambda_{MM} = \frac{2}{h^2 bE} \int_0^{\xi} Y_M^2(\xi) \mathrm{d}\xi. \tag{5- 14}$$

وبنفس الطريقة، من المعادلة (5-10) و (5-6) نحصل على عامل المطاوعة λ_{pp}:

$$\lambda_{PP} = \frac{2}{bE} \int_{c/h}^{\xi} Y_P^2(c/h, \xi) \mathrm{d}\xi. \tag{5- 15}$$

وأيضاً بتعويض كل من المعادلتين (5-8) و (5-10) في المعادلة (5-7) وتقسيمها على الجداء PM نحصل على عامل المطاوعة λ_{MP} أو عامل المطاوعة λ_{PM} بالشكل التالي:

$$\lambda_{PM} = \lambda_{MP} = \frac{2}{hbE} \int_{c/h}^{\xi} Y_M(\xi) Y_P(c/h, \xi) \mathrm{d}\xi. \qquad (5\text{-}16)$$

وهكذا تكون أوجدنا العلاقات التي تعطينا عوامل المطاوعة والتي تمكننا من حساب التشوهات للعنصر المتشقق سواء منها الانتقالات أو الدورانات.

5-2-3 تحديد حالة التسليح

لنجعل العنصر المتشقق الموضح في الشكل (5-1) يخضع لعزم انعطاف M ، إن القوة المحورية الناشئة في التسليح هي:

$$P = \sigma_s A_s \qquad (5\text{-}17)$$

حيث:

σ_s الإجهاد المتولد في التسليح.

A_s مساحة التسليح.

وبفرض أن الانتقال $\Delta\delta$ المعطى بالمعادلة (5-1) يساوي الصفر عند عزم أصغر من العزم الذي يسبب خضوع التسليح يكون:

$$\Delta\delta = \Delta\delta_{PM} + \Delta\delta_{PP} = \lambda_{PM} M - \lambda_{PP} P = 0 \qquad (5\text{-}18)$$

إن هذه المعادلة تمكننا من الحصول على القوة المجهولة P كتابع للعزم المطبق M ، بتعويض المعادلتين (5-15) و (5-16) في المعادلة (5-18) نحصل على ما يلي:

$$\frac{Ph}{M} = \frac{1}{r''(c/h, \xi)} \qquad (5\text{-}19)$$

حيث:

$$r''(c/h, \xi) = \frac{\int_{c/h}^{\xi} Y_P^2(c/h, \xi) \mathrm{d}\xi}{\int_{c/h}^{\xi} Y_M(\xi) Y_P(c/h, \xi) \mathrm{d}\xi} = \frac{\lambda_{PP}}{\lambda_{PM} h}. \qquad (5\text{-}20)$$

باعتبار أن التسليح يسلك سلوكاً مرن– لدن تام، أصبح بالإمكان معرفة قيمة العزم الذي يسبب خضوع التسليح وذلك من العلاقة التالية:

$$M_P = P_P h r''(c/h, \xi) \qquad (5\text{-}21)$$

حيث:

P_p القوة التي يخضع عندها التسليح وتساوي:

$$P_P = f_y A_s$$

f_y إجهاد خضوع التسليح.

وبالتالي في حال تحقق $\frac{M}{P_p h} \geq r''(c/h, \xi)$ يكون التسليح قد وصل لمرحلة الخضوع إلا فالتسليح لم يصل لمرحلة الخضوع بعد.

5–2–4 استقرار انهيار البيتون

إن K_1 معامل شدة الإجهاد (stress–intensity factor) للعنصر الموضح بالشكل (5–1) يحسب من المجموع الجبري لمعامل شدة الإجهاد الناتج عن العزم K_{1M} ومعامل شدة الإجهاد الناتج عن القوة في التسليح K_{1P} .

من أجل $M < M_P$ يكون:

$$K_I = \frac{M}{h^{3/2}b} Y_M(\xi) - \frac{P}{h^{1/2}b} Y_P(c/h, \xi) \qquad (5\text{-}22)$$

من أجل $M > M_P$ يكون:

$$K_I = \frac{M}{h^{3/2}b} Y_M(\xi) - \frac{P_P}{h^{1/2}b} Y_P(c/h, \xi) \qquad (5\text{-}23)$$

بالاستفادة من المعادلة (5-19) يمكن أن نكتب المعادلة (5-22) بالشكل:

$$K_I = \frac{M}{h^{3/2}b} Y_M(\xi) - \frac{1}{h^{1/2}b} Y_P(c/h, \xi) \frac{1}{r''(c/h, \xi)} \frac{M}{h} \qquad (5\text{-}24)$$

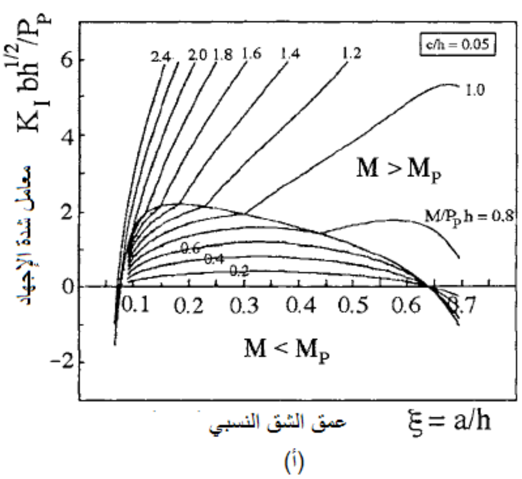
وباعتماد الشكل اللا بعدي للمعادلة (5-24) نحصل على ما يلي:

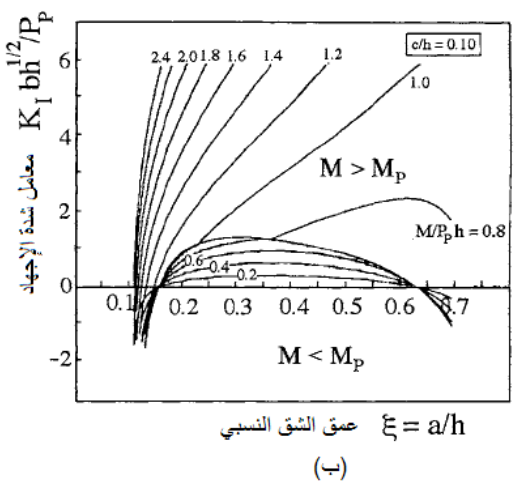
$$\frac{K_I h^{1/2} b}{P_P} = \frac{M}{P_P h} \left[Y_M(\xi) - Y_P(c/h, \xi) \frac{1}{r''(c/h, \xi)} \right]. \qquad (5\text{-}25)$$

وبنفس الطريقة من أجل المعادلة (5-23) نحصل على ما يلي:

$$\frac{K_I h^{1/2} b}{P_P} = Y_M(\xi)\frac{M}{P_P h} - Y_P(c/h, \xi). \qquad (5\text{-}26)$$

من أجل رسم العلاقة التي تربط معامل شدة الإجهاد K_1 مع عمق الشق ξ يجب أن نعرف ما هي حالة التسليح، ففي حال تحقق أن $\frac{M}{P_P h} \geq r''(c/h, \xi)$ يكون التسليح قد وصل لمرحلة الخضوع ويتم حساب معامل شدة الإجهاد من العلاقة (5-26) وإلا فيجب اعتماد العلاقة (5-25) مع إجهاد σ_s أدنى من f_y.





الشكل (5−2) العلاقة اللابعدية لعرض الشق النسبي ومعامل شدة الإجهاد من أجل قيم متغيرة للعزم [8].
(أ) $c/h = 0.05$، (ب) $c/h = 0.10$.

في الشكل (5−2) تم رسم المنحنيات التي تربط بين معامل شدة إجهاد وبين عرض الشق النسبي من أجل $c/h = 0.05$ الحالة (أ) و $c/h = 0.10$ الحالة (ب) وتم في كل حالة أخذ قيم مختلفة للبارامتر $M/P_P h$.

من الشكل (5−2−أ) نلاحظ وجود خط فاصل بحيث المنحنيات الموافقة للقيم $M/P_P h \leq 0.8$ تقع كلها تحته ويبقى التسليح ضمن هذا المجال في الحالة المرنة، أما المنحنيات المقابلة لـ $M/P_P h \geq 0.8$ فإن جزء منها فقط ينتمي للخط الفاصل، وبالتالي يجب التحقق من حالة التسليح عند القيم الصغيرة لعمق الشق النسبي ξ.

مما سبق نجد أن التسليح يبقى بالحالة المرنة مع اتساع وامتداد الشق إما لأن كمية التسليح كبيرة أو لأن الشق صغير.

إن الملاحظات والاستنتاجات التي أمكن الوصول إليها من الحالة (أ) هي نفسها من أجل الحالة (ب) الشكل (5−2) باستثناء أنه مساحة المنطقة التي يكون فيها التسليح مرناً في الحالة (ب) أصغر، ومن أجل الحالتين فإن جميع المنحنيات الموافقة للحالة المرنة تبدي قيمة أعظمية لمعامل شدة الإجهاد عند $\xi \approx 0.35$.

5−2−5 عزم الانعطاف المسبب لانكسار البيتون

نحصل على عزم الانكسار عندما يكون معامل شدة الإجهاد K_1 يساوي مصفوفة قساوة الانكسار K_{1c} ، بالتعويض في المعادلة (5-22) نحصل على:

$$\frac{M_F}{K_{IC}h^{3/2}b} = \frac{1}{Y_M(\xi)} + \frac{P}{K_{IC}h^{1/2}b}\frac{Y_P(c/h,\xi)}{Y_M(\xi)}. \qquad (5-27)$$

ونميز حالتين:

- الحالة الأولى: الانكسار يحصل والتسليح قد وصل لمرحلة الخضوع بالتالي تصبح المعادلة (5-27) بالشكل:

$$\frac{M_F}{K_{IC}h^{3/2}b} = \frac{1}{Y_M(\xi)} + N_P\frac{Y_P(c/h,\xi)}{Y_M(\xi)} \qquad (5-28)$$

حيث:

$$N_P = \frac{f_y h^{1/2}}{K_{IC}}\frac{A_s}{A} \qquad (5-29)$$

N_P عدد الهشاشة وسيستخدم لاحقاً بتحديد نسبة التسليح الأصغرية.

A المساحة الكلية للمقطع العرضي $A = bh$.

- الحالة الثانية: الانكسار يحصل والتسليح في الحالة المرنة، أي $M = M_F < M_P$ وعندها يكون:

$$\frac{\sigma_s}{f_y} = \frac{M_F}{M_P}$$

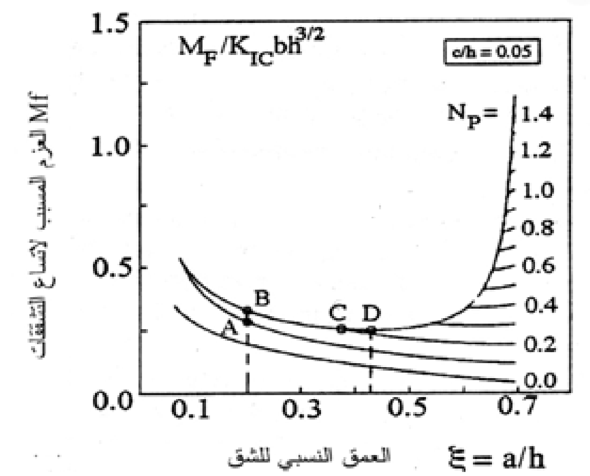
بالتالي :

$$P = \sigma_s A_s = f_Y\left(M_F / M_P\right)A_s$$

بالتعويض في المعادلة (5-27) نحصل على ما يلي:

$$\frac{M_F}{K_{IC}h^{3/2}b} = \frac{1}{Y_M(\xi)} + N_P \frac{M_F}{M_P} \frac{Y_P(c/h,\xi)}{Y_M(\xi)} \qquad (5-30)$$

في الشكل (5−3) تم رسم المنحنيات التي تربط بين عزم الانكسار اللا بعدي مع عرض الشق النسبي ξ من أجل $c/h = 0.05$ وبأخذ قيم متغيرة لعدد الهشاشة N_P .



الشكل (5−3) عزم الانعطاف المسبب لاتساع الشق المقابلة لعرض الشق النسبي من أجل قيم متغيرة لعدد الهشاشة [8].

نلاحظ من الشكل (5−3) أن المنحنيات الموافقة لـ $N_P \leq 0.2$ تنخفض على كامل مجال ξ، وهذا يعني أن عزم الانكسار يقل مع استمرار امتداد الشق وبالتالي فإن الانكسار غير مستقر. أما المنحنيات الموافقة لـ $N_P \geq 0.3$ فإن عزم الانكسار يزداد مع استمرار امتداد الشق وبالتالي فإن الانكسار مستقر.

5−2−6 الانهيار الهش والانهيار اللدن

تبين لنا سابقاً أن الانكسار مستقر من أجل $N_P \geq 0.3$ وغير مستقر من أجل $N_P \leq 0.2$ ، ولتحديد قيمة N_{PC} عدد الهشاشة الحدي الذي ينقلنا من الانهيار الهش إلى الانهيار اللدن سيتم اعتماد المعادلة (5-28) مع افتراض أن:

$$M_F = P_P(h-c) \approx P_P h$$

وبالتالي يكون:

$$\frac{M_F}{K_{IC}h^{3/2}b} = \frac{1}{Y_M(\xi)} + N_P\frac{Y_P(c/h,\xi)}{Y_M(\xi)} \approx \frac{P_P h}{K_{IC}h^{3/2}b} \qquad (5\text{-}31)$$

بالإصلاح نجد :

$$N_{PC} = \frac{1}{Y_M(\xi) - Y_P(c/h,\xi)}. \qquad (5\text{-}32)$$

وهكذا أصبح بالإمكان تحديد عدد الهشاشة الحدي N_{PC} من خلال المواصفات الهندسية للمقطع العرضي، وبالاعتماد عليه يمكن أن نميز حالة الانكسار إذا كانت مستقرة عندما $N_P > N_{PC}$ أو غير مستقرة عندما $N_P < N_{PC}$.

5-2-7 التسليح الأصغري

لقد قدم كل من كارينتري وبوسكو معدي البحث علاقة تجريبية مبسطة لحساب N_{PC} هي:

$$N_{PC} = 0.1 + 0.0023 f^{'} \qquad (5\text{-}33)$$

من مساواة عدد الهشاشة الحدي N_{PC} المعطى في العلاقة (5-33) مع عدد الهشاشة N_P في العلاقة (5-29) نحصل على نسبة التسليح الأصغرية $\mu_{\min}$ وهي:

$$\mu_{\min} = (0.1 + 0.0023 f^{'})\frac{K_{1C}}{f_y h^{0.5}} \qquad (5\text{-}34)$$

حيث:

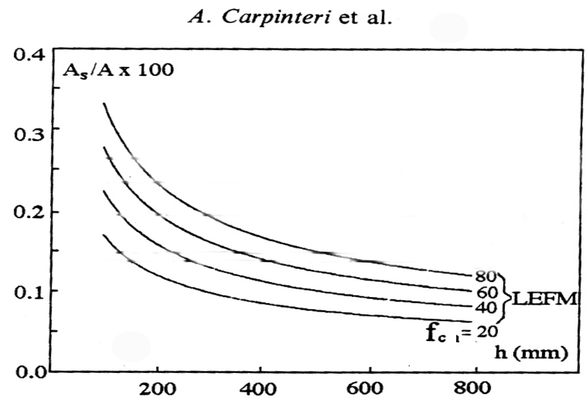
K_{1C} معامل شدة الإجهاد ويحسب من العلاقة:

$$K_{1C} = \sqrt{G_F E} \qquad (5\text{-}35)$$

G_F طاقة الانكسار.

E معامل يونغ للبيتون.

تم في الشكل (5-4) إيجاد قيم نسب التسليح الأصغرية وفق العلاقة (5-34) المقابلة لارتفاع الجائز وذلك من أجل أربعة قيم لمقاومة البيتون على الضغط.



الشكل(5-4) نسب التسليح الأصغري وفق النموذج الأول نموذج ميكانيكية الانكسار [8].

نلاحظ من الشكل (5-4) أن نسب التسليح الأصغري المحددة وفق النموذج الأول تقل مع زيادة ارتفاع الجائز وتزداد بزيادة مقاومة البيتون على الضغط.

وهكذا نجد أن النموذج الأول أعطى علاقة لحساب نسبة التسليح الأصغرية يدخل فيها عوامل إضافية مثل ارتفاع الجائز الذي لا تأخذه الكودات بعين الاعتبار.

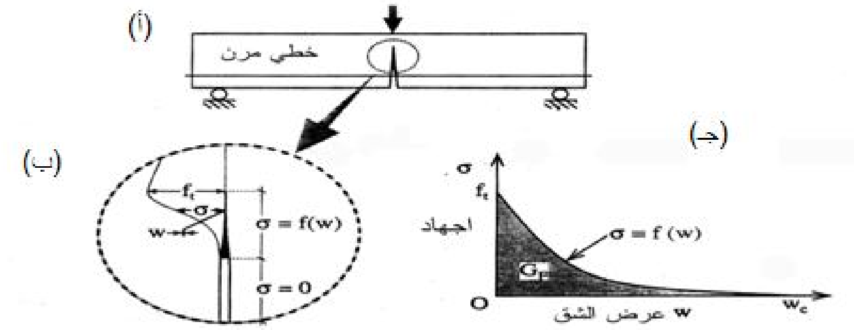
5-3 النموذج الثاني: نموذج الطولالفعّال للانزلاق [17]

5-3-1 أساسيات النموذج

يفترض نموذج Ruiz, Elices [17] مايلي :

5-3-1-1 آلية الانـهيار

- يحصل في الجوائز البيتونية بسيطة الاستناد و المسلحة بتسليح قليل شق وحيد في منتصف الجائز.
- الشق الحاصل هو شق مترابط (cohesive crack) أي أن هناك إجهادات تنتقل بين وجهي الشق شكل(5-5).



الشكل (5-5) (أ) الجائز بسيط الاستناد مع حمولة في المنتصف،(ب) تفاصيل الشق المترابط، (جـ) علاقة انخفاض التحمل [17].

يبدأ الشق المترابط بالظهور عندما تصل قيمة الإجهادات الرئيسية إلى تحمل البيتون على الشد f_t ويكون اتجاه الشق عمودي على اتجاه الإجهادات الرئيسية الأعظمية. يتم انتقال الإجهادات بشكل عمودي على وجهي الشق بحيث تكون قيمة هذه الإجهادات تابعة لعرض الشق كما يلي:

$$\sigma = f(w), \qquad \begin{cases} f(0) = f_t \\ f(w) \geq 0 \end{cases} \qquad (5\text{-}36)$$

يسمى التابع f(w) بتابع انخفاض التحمل أو تابع التليين (softening relation) ويعتبر كأحد مواصفات المادة وتنعدم قيمته عندما يصل عرض الشق إلى القيمة الحرجة w_c كما هو موضح بالشكل(5-5-ب).

إن طاقة الانكسار G_F (fracture energy) هي العمل اللازم لفصل مساحة مقدارها واحدة السطح من وجهي الشق عن بعضهما وتؤخذ على أنها مساوية للمساحة المحصورة تحت منحني انخفاض التحمل (softening relation) شكل(5-5-جـ).

هناك بارامتر آخر يُعتمد في دراسة البيتون ويصف الهشاشة الفعلية له يدعى الطول المميز (characteristic length) يرمز له بالرمز l_{ch} ويحسب كما يلي:

$$l_{ch} = \frac{E\,G_F}{f_t^2} \quad (5\text{-}37)$$

حيث:

G_f طاقة الانكسار (fracture energy) وهي العمل اللازم لفصل وجهي الشق عن بعضهما.

E عامل المرونة للبيتون.

f_t مقاومة البيتون على الشد .

5-3-1-2 سلوك المواد

- يسلك البيتون سلوكاً خطياً مرناً خارج منطقة الانكسار .
- إن علاقة إجهاد – تشوه للفولاذ تؤخذ على أنها مرنة – لدنة .

5-3-1-3 التماسك بين الفولاذ والبيتون

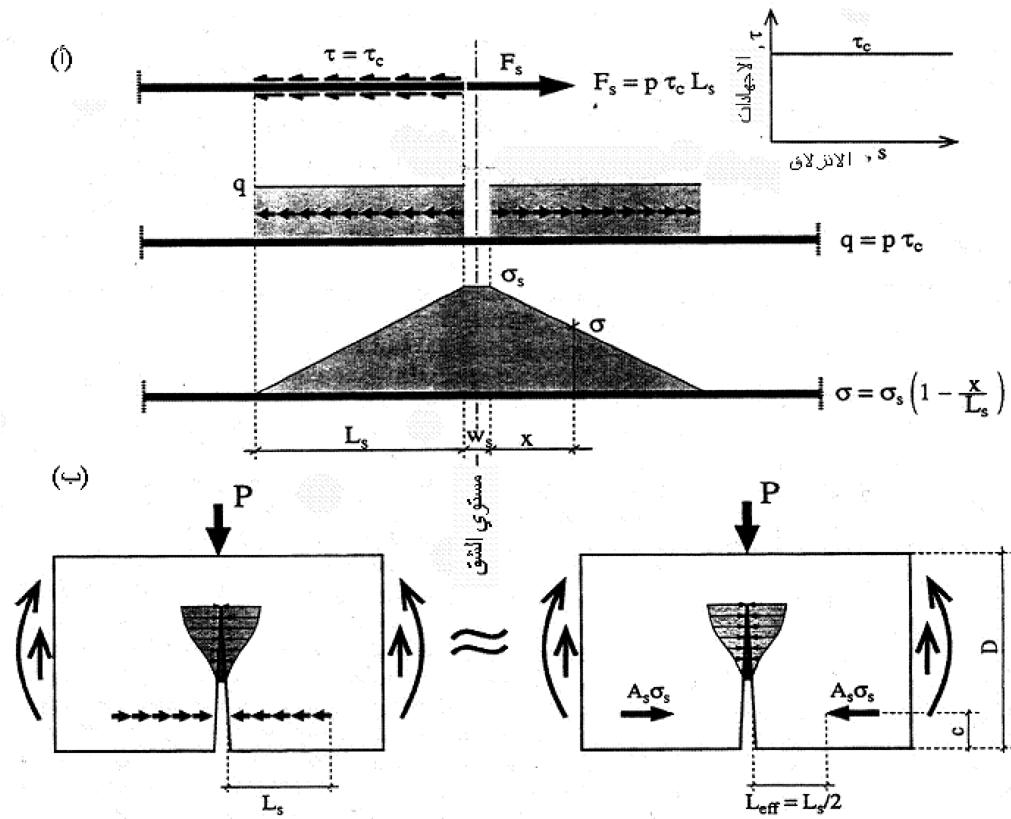
- يؤخذ إجهاد التماسك τ المنقول بين الفولاذ والطبقة المحيطة من البيتون كتابع للانزلاق s الحاصل بين البيتون والفولاذ بالشكل المبسطو التقريبي التالي شكل (5-6-أ) :

$$\begin{cases} \tau \le \tau_c & \text{if} \quad s = 0 \\ \tau = \tau_c & \text{if} \quad s \ne 0 \end{cases} \quad (5\text{-}38)$$

τ إجهاد التماسك عند السطح البيني للبيتون والفولاذ.

τ_c إجهاد التماسك الأعظمي بين المادتين والذي يحدث عنده انزلاق.

s الانزلاق النسبي الحاصل بين المادتين



الشكل (5–6) (أ) إجهادات قضبان التسليح. (ب) رد الفعل الميكانيكي الناتج عن التسليح في الجائز البيتوني [17].

– يعوض عن إجهادات التماسك الموزعة τ_c بزوج من القوى المركز و المطبق داخل البيتون ضمن الطول الذي يحدث عنده الانزلاق الشكل (5–6–ب).

إن قيمة إجهاد القص ثابتة على طول الانزلاق الشكل (5–6–أ) وبالتالي من توازن القوى على مسافة x من مستوي الشق يمكننا أن نكتب :

$$A_s\sigma(x)=\tau_c p(L_s-x)$$

p محيط قضبان التسليح.

L_s الطول الذي يحدث عليه الانزلاق.

A_s مساحة التسليح المستخدم .

$\sigma(x)$ الإجهاد في التسليح عند المسافة x من مستوي الشق.

وبالتالي فإن القوة الكلية F_s هي:

$$F_s = A_s\sigma_s = \tau_c p L_s$$

ومنه فإن L_s طول الانزلاق يعطى بالعلاقة :

$$L_s = \frac{A_s\ \sigma_s}{\tau_c\ p} \qquad (5\text{-}39)$$

نحصل على العلاقة بين القوة وw_s عرض الشق عند مستوى التسليح بمكاملة التشوه على كامل طول الانزلاق كمايلي:

$$w_s = 2\int_0^{L_s} \varepsilon[\sigma(x)]\ dx \qquad (5\text{-}40)$$

حيث $\varepsilon(\sigma)$ تشوهات التسليح تحت تأثير الإجهاد σ.

من أجل فولاذ مرن – لدن يمكن إيجاد العلاقة بين F_S و w_s وذلك بالاستفادة من (5-39) و(5-40) وهي:

$$F_s = A_s\ \sigma_s = \begin{cases} A_s\left(E_s\tau_c\frac{p}{A_s}\right)^{1/2}\sqrt{w_s} & \text{if } w_s < w_y = \dfrac{A_s f_y^2}{E_s\tau_c p} \\ A_s f_y & \text{if } w_s > w_y \end{cases} \qquad (5\text{-}41)$$

حيث

f_y إجهاد خضوع التسليح.

E_S معامل يونغ للتسليح.

إن القوة F_S تتوضع على المسافة L_{eff} من محور الشق الشكل (5–6–ب) وبما أن توزع الإجهادات منتظم على L_s طول الانزلاق فإن نقطة تطبيق F_S تكون عند منتصف طول الانزلاق أي:

$$L_{eff} = L_s/2$$

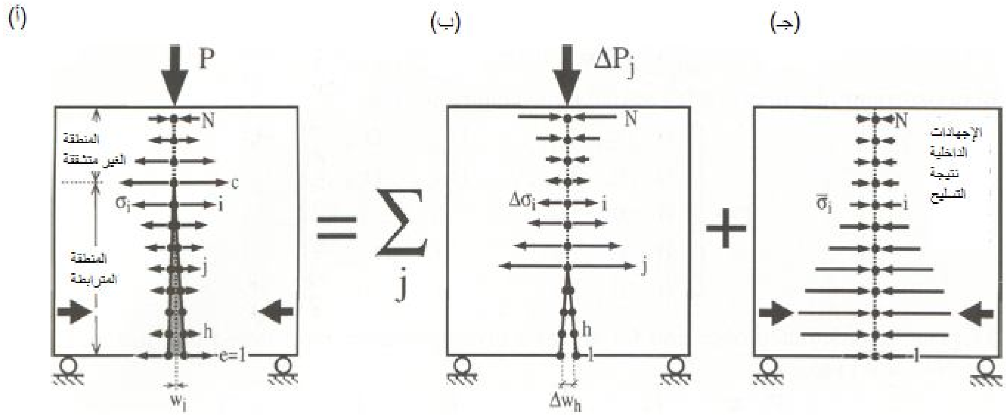
وبالتالي من العلاقة (5-41) و (5-39) نجد أن :

$$L_{eff} = \begin{cases} \sqrt{\dfrac{A_s E_s}{4\ \tau_c\ p}\ w_s} & \text{for } \quad w_s < w_y = \dfrac{A_s f_y^2}{E_s\tau_c p} \\ \dfrac{A_s\ f_y}{2\ \tau_c\ p} & \text{for } \quad w_s > w_y \end{cases} \qquad (5\text{-}42)$$

إن التعويض عن رد فعل التسليح بزوج من القوى– قوة واحدة في كل جانب من جانبي الشق– كان له فعالية كبيرة في تسهيل المعالجة التحليلية واستخدام برامج العناصر المحدودة التي تعتمد طريقة smeared-tip والتي سنأتي على شرحها في الفقرة التالية.

5-3-2 طريقة smeared-tip مع إجهادات داخلية

إن الحل في هذه الطريقة يؤخذ كتراكب للحالات المرنة كما هو موضح في الشكل (5-7) حيث الإجهادات والانتقالات من أجل الحالة اللا خطية الشكل(5-7-أ) تؤخذ كمجموع لـ N حالة مرنة مقابلة لـ N طول شق مختلف الشكل (5-7-ب) يضاف إليها الحالة المرنة الناتجة عن الإجهادات الداخلية للعنصر الغير متشقق نتيجة وجود التسليح الشكل (5-7-ج).



الشكل (5-7) تراكب الحالات المرنة في طريقة smeared-tip [17].

وبالتالي يمكن أن نكتب ما يلي:

$$P = \sum_{j=1}^{N} \Delta P_j \qquad (5\text{-}43)$$

$$\delta = \sum_{j=1}^{N} C_j \, \Delta P_j + \bar{\delta} \qquad (5\text{-}44)$$

$$\sigma_i = \sum_{j=1}^{N} R_{ij} \, \Delta P_j + \bar{\sigma}_i \qquad i = 1, 2, \ldots, N \qquad (5\text{-}45)$$

$$w_i = \sum_{j=1}^{N} D_{ij} \, \Delta P_j \qquad i = 1, 2, \ldots, N \qquad (5\text{-}46)$$

حيث:

P القوة المطبقة.

δ الانتقال عند نقطة تطبيق القوة.

σ_i الإجهاد عند العقد.

w_i عرض الشق عند العقد.

C_j الانتقال عند نقطة تطبيق القوة والناتج عن واحدة القوى من أجل شق ذروته متوضعة عند العقدة j.

$\bar{\delta}$ الانتقال عند نقطة تطبيق القوة والناتج عن حقل الإجهادات الداخلية للتسليح.

$\bar{\sigma}_i$ الإجهادات الداخلية الناتجة عن التسليح في العقدة i.

R_{ij} عنصر من مصفوفة رد الفعل R.

D_{ij} عنصر من مصفوفة الانتقال D.

ولتوضيح أكثر فإن R_{ij} هو قوة رد الفعل عند العقدة i نتيجة تطبيق قوة واحدية خارجية عندما يصل الشق إلى العقدة j، وعليه كل عناصر المصفوفة التي توافق $i < j$ ستساوي الصفر.

$$R_{ij} = 0 \quad \text{if } i < j \qquad (5\text{-}47)$$

أي أن المصفوفة R مصفوفة مثلثية سفلية كما يلي:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} R_{11} & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ R_{21} & R_{22} & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & 0 & 0 \\ R_{N-1\,1} & R_{N-1\,2} & R_{N-1\,3} & \dots & R_{N-1\,N-1} & 0 \\ R_{N1} & R_{N2} & R_{N3} & \dots & R_{N\,N-1} & R_{NN} \end{bmatrix} \qquad (5\text{-}48)$$

أيضاً فإن D_{ij} هو عرض الشق عند العقدة i نتيجة تطبيق قوة واحدية خارجية عندما يصل الشق إلى العقدة j، وعليه كل عناصر المصفوفة التي توافق $i \geq j$ ستساوي الصفر.

$$D_{ij} = 0 \quad \text{if } i \geq j \qquad (5\text{-}49)$$

أي أن المصفوفة D مصفوفة مثلثية سفلية مع عناصر قطرية صفرية كما يلي:

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} 0 & D_{12} & D_{13} & \dots & D_{1\,N-1} & D_{1N} \\ 0 & 0 & D_{23} & \dots & D_{2\,N-1} & D_{2N} \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & D_{N-1\,N} \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix} \qquad (5\text{-}50)$$

إن كل من المصفوفات R, D و المصفوفة C_j يتم حسابها مرة واحدة بالاعتماد على المواصفات الهندسية للجائز وتخزن في مصفوفة M أبعادها $N \times (N+1)$:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} R_{11} & D_{12} & D_{13} & \dots & D_{1\,N-1} & D_{1N} & C_1 \\ R_{21} & R_{22} & D_{23} & \dots & D_{2\,N-1} & D_{2N} & C_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ R_{N-1\,1} & R_{N-1\,2} & R_{N-1\,3} & \dots & R_{N-1\,N-1} & D_{N-1\,N} & C_{N-1} \\ R_{N1} & R_{N2} & R_{N3} & \dots & R_{N\,N-1} & R_{NN} & C_N \end{bmatrix} \qquad (5\text{-}51)$$

سنعتبر أن الشق امتدّ حتى النقطة c الشكل (5−7−أ) وسنستخدم المعادلات (5-45) و(5-46) للحصول على الإجهادات وعرض الشق حسب العلاقة (1) الخاصة بالشق المترابط $\sigma_i = f(w_i)$ فيكون:

$$\sum_{j=1}^{N} R_{ij}\,\Delta P_j + \bar{\sigma}_i = f\left(\sum_{j=1}^{N} D_{ij}\,\Delta P_j\right) \qquad i = 1, 2, \ldots, c \qquad (5\text{-}52)$$

$$\sum_{j=1}^{N} D_{ij}\,\Delta P_j = 0 \qquad i = c, c+1, \ldots, N \qquad (5\text{-}53)$$

لحل هذه المسألة نبدأ بالمعادلة (5-53) ذات الحل الصفري بالشكل:

$$\Delta P_j = 0 \quad \text{for} \quad j = c+1, c+2, \ldots N \qquad (5\text{-}54)$$

وبتعويضها في (17) مع الإصلاح نجد:

$$\sum_{j=1}^{c} R_{ij}\,\Delta P_j = f\left(\sum_{j=1}^{c} D_{ij}\,\Delta P_j\right) - \bar{\sigma}_i \qquad i = 1, 2, \ldots, c \qquad (5\text{-}55)$$

وبالتالي نكون قد حصلنا على جملة معادلات عددها c مع المجاهيل ΔP_j حيث (j=1,…….c)، والتي نحصل على حل لها بالتكرار.

إن $\bar{\sigma}_i$ في العلاقة (5-55) هو الإجهادات المتولدة عند جانبي الشق في الحالة الغير متشققة المرنة شكل (5−7−جـ) بسبب القوة F_s المعطاة بالعلاقة (5-41) والمتوضعة عند L_{eff} علاقة (5-42)، سنكتفي هنا بالإشارة إلى أن هذا التوزع يكتب بالشكل:

$$\bar{\sigma} = \mu \frac{F_s}{A_s} F'(H, y, c, L_{eff}) \qquad (21)$$

حيث:

μ نسبة التسليح.

H ارتفاع الجائز.

y المسافة بين النقطة المعتبرة في المقطع العرضي في المنتصف وأسفل الجائز.

c مسافة تغطية البيتون للتسليح.

5-3-3 تأثير الخواص الهندسية وخو اص المواد

تم إجراء حسابات عديدة لمعرفة ما هو تأثير البارامترات الهندسية والمادية التي تتضمنها هذه المسألة على منحنيات قوة – انتقال التي تم أخذها بالشكل اللابعدي التالي:

$$P^* = \frac{\sigma_N}{f_t} = \frac{3}{2}\frac{P}{BH^2}\frac{s}{f_t} \quad , \quad \delta^* = \delta\frac{f_t}{G_F} \qquad (5\text{-}57)$$

إن البارامترات التي تم دراستها هي:

$$n = \frac{E_s}{E_c} \;,\; \beta_h = \frac{H}{l_{ch}} \;,\; \mu = \frac{A_s}{A_c} \;,\; f_y^* = \frac{f_y}{f_t} \;,\; \eta = \left(n\frac{\tau_c}{f'c}\frac{pl_{ch}}{A_s}\right)^{1/2} \qquad (5\text{-}58)$$

حيث:

n النسبة المعيارية بين البيتون و التسليح.

β_h عدد هيلربورغ الخاص بالهشاشة (Hillerborg brittleness number) والذي يظهر تأثير ارتفاع الجائز.

H ارتفاع الجائز.

l_{ch} الطول المميز (characterisic length) وقد سبق شرحه في العلاقة (5-37).

μ نسبة التسليح .

f^*_y إجهاد الخضوع للفولاذ بشكله اللابعدي .

η بارامتر يعبر من خلاله عن التماسك وهو يتعلق فقط بـ :

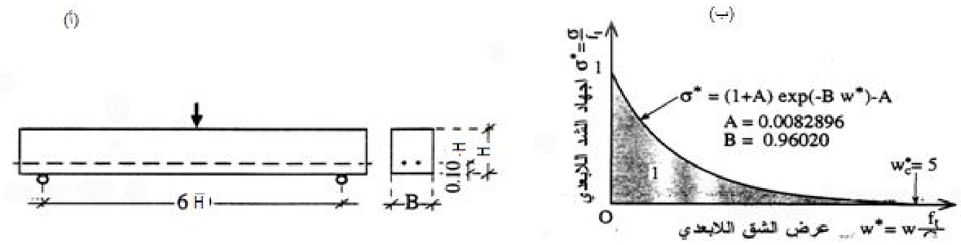
τ_c إجهاد التماسك بين الفولاذ والبيتون.

p محيط قضبان التسليح .

n النسبة المعيارية بين البيتون والفولاذ.

في حين أن بقية العوامل f_t وl_{ch} و مساحة التسليح A_s تم وضعها للحصول على الشكل اللابعدي للعامل η.

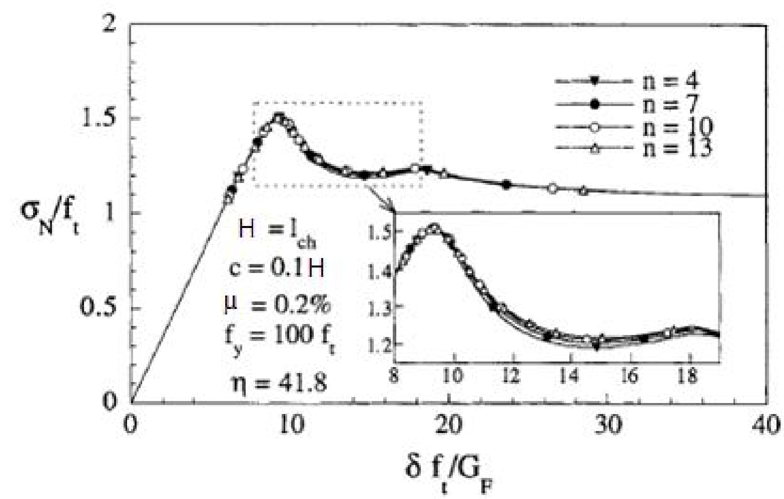
سيتم فيما يلي عرض النتائج العددية وفق هذا النموذج التي تظهر تأثير البارامترات السابقة على سلوك الجائز الموضح في الشكل (5–8) حيث سيتم تغيير قيمة البارامتر المدروس مع بقاء قيم البارامترات الأخرى ثابتة.



الشكل(5–8) (أ) أبعاد الجائز(ب) (softening relation) المستخدم في الدراسة.[17]

5–3–3–1 تأثير النسبة المعيارية

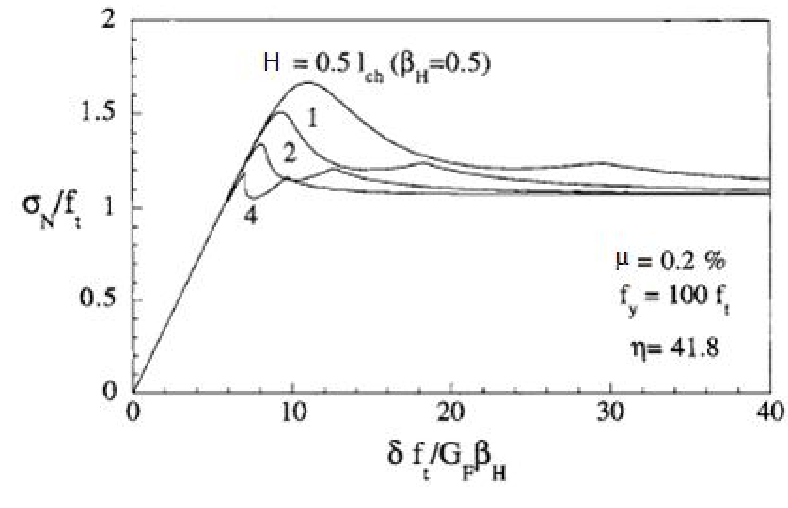
إن الشكل(5–9) يظهر منحنيات قوة – انتقال اللا بعدية من أجل $4 \leq n \leq 13$. نلاحظ من الشكل أن تأثير n محصورا فقط في المجال الوسطي والذي هو مرحلة انتقالية بين السلوك المرن والسلوك اللدن للجائز ، في هذا المجال يبدأ التشقق في البيتون ولا يزال التسليح بالحالة المرنة، وعلى الرغم من أن تأثير n صغير هنا ولكنها تؤثر في النتائج العددية لهذا النموذج من خلال البار امتر η .



الشكل (5–9) تأثير n النسبة المعيارية على منحنيات قوة – انتقال [17].

5–3–3–2 تأثير الحجم

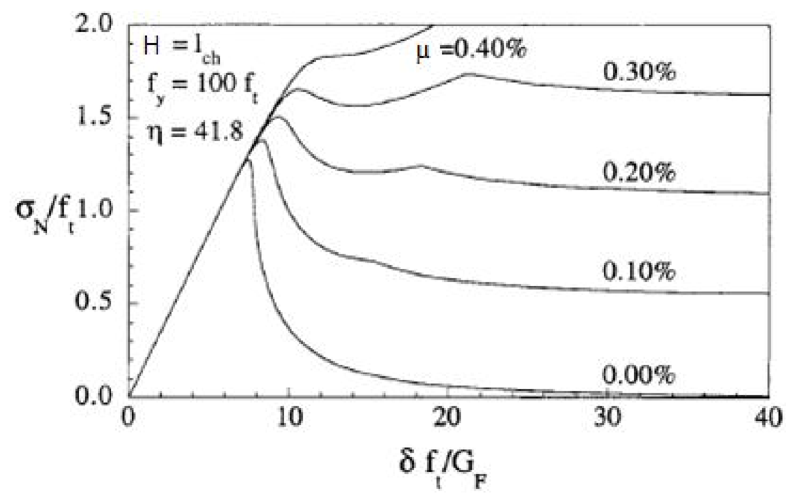
إن الشكل(5–10) يظهر منحنيات قوة – انتقال اللا بعدية من أجل أربعة قيم لـ β_h عدد هيلربورغ، كما هو ملاحظ من الشكل كل زيادة في قيمة β_h يرافقها نقصان في قيمة القوة التي يبدأ عندها التشقق أي أن استجابة الجائز تصبح أضعف كلما زاد الارتفاع ، بالتالي وفقاً لهذا النموذج يكون للحجم أثر على استجابة الجائز.



الشكل (5−10) تأثير الارتفاع على منحنيات قوة – انتقال [17].

5−3−3−3 تأثير نسبة التسليح

إن الشكل (5−11) يظهر منحنيات قوة – انتقال اللا بعدية من أجل قيم لـ μ تتراوح من 0.00% وحتى 0.40% ، يظهر من الشكل بأن القوة التي تسبب التشقق تزداد بزيادة نسبة تسليح الجائز، إن هذه الزيادة لا تتعلق بـ μ وحسب وإنما بـ μ و f^*_y معاً، كذلك فإن الاستجابة في المنطقة الوسطية من المنحنيات تتأثر بشدة بالقوة التي تعمل على إغلاق الشق والتي تتعلق بدورها بالجداء $\eta\ \mu$.

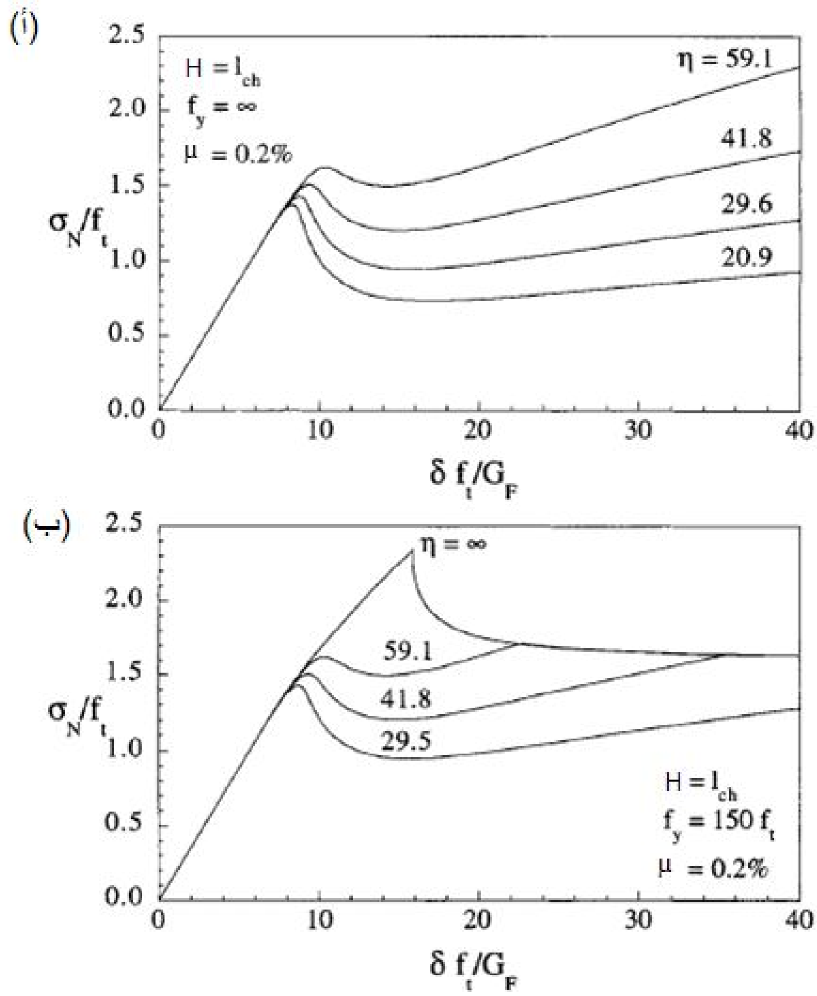


الشكل (5−11) تأثير نسبة التسليح على منحنيات قوة – انتقال [17].

5-3-3-4 تأثير خواص التماسك

لدراسة أثر التماسك على هذا النموذج سنأخذ الحالتين التاليتين:

- حالة تسليح مرن خطي ولا وجود للفرع اللدن ($f_y=\infty$) الشكل (5-12-أ) نلاحظ أنه كلما زاد التماسك زادت قيمة القوة التي يحدث عندها التشقق وكانت الاستجابة بعدها أقوى وأقسى.
- حالة تسليح يخضع عند ($f_y=150ft$) الشكل (5-12- ب) في هذه الحالة نلاحظ أن كل منحني يقسم إلى جزئين الجزء الأول عندما يكون التسليح في الحالة المرنة وبالتالي يكون الأمر مشابه لما ذكر في الحالة الأولى، الجزء الثاني بعد أن يخضع التسليح عندها لا تعود الاستجابة متعلقة بقوة التماسك وا ٍنما يتحكم بها إجهاد الخضوع f_y ونسبة التسليح μ.



الشكل (5-12) تأثير التماسك على منحنيات قوة – انتقال [17].

5-3-4 صيغة لحساب نسبة التسليح الأصغري

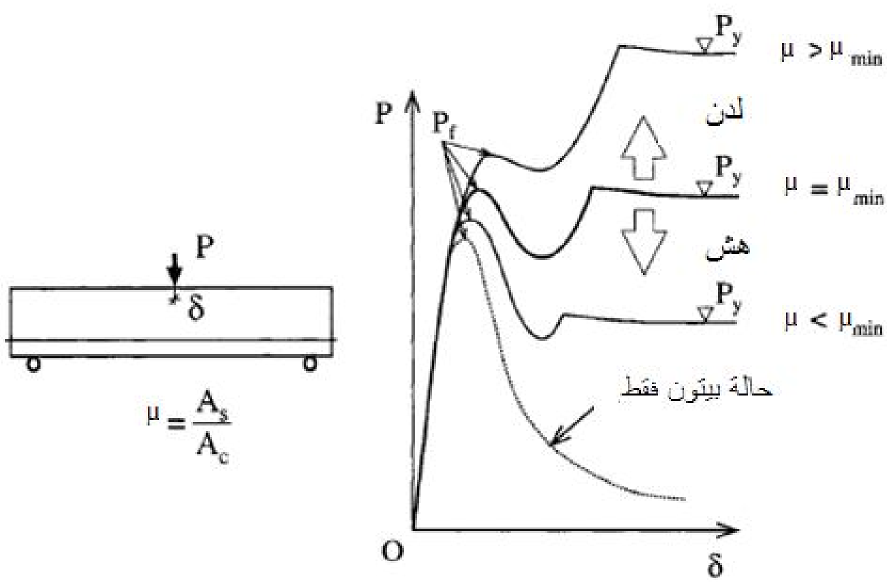
تؤثر قيمة μ نسبة التسليح الموضوعة في الجائز بشكل كبير على شكل الانهيار، من الشكل (5–13) نلاحظ أنه لدينا ثلاثة حالات حسب قيمة μ وهي :

- انهيار هش : $P_f > P_y$ وذلك عند $\mu < \mu_{min}$.
- الحالة الحرجة أو الحدية ومنها نحصل على نسبة التسليح الأصغرية : $P_y=P_f$ وبالتالي $\mu_{min} = \mu$ (5-59)
- انهيار لدن : $P_f < P_y$ وذلك عند $\mu > \mu_{min}$.

حيث:

P_f أكبر قوة يحدث عندها التشقق.

Py القوة التي يحدث عندها خضوع التسليح بعد حصول التشقق بشكل كامل وتدعى قوة الخضوع الحدية (ultimate yielding load) .



الشكل (5–13) تغير سلوك الجائز المسلح مع تغير نسبة التسليح [17].

لإيجاد صيغة تحسب نسبة التسليح الأصغرية μ_{min} باعتماد نموذج الطولالفعّال للانزلاق سنأخذ الحالة الثانية من (5-59) ونضع جملة العوامل التي تؤثر في كل طرف من المعادلة ثم نجد العوامل التي تدخل في تحديد μ_{min} كما يلي:

$$P_f(.....,\mu_{min},.....) = P_y(.....,\mu_{min},.....) \Rightarrow \mu_{min}(H,c,f_y,\tau_c) \quad (5\text{-}60)$$

حيث:

μ_{min} نسبة التسليح الأصغري .

H ارتفاع الجائز.

c تغطية التسليح.

f_y إجهاد خضوع التسليح.

τ_c إجهاد التماسك.

للحصول على الصيغة تمت اعتماد النتائج العددية للنموذج ، ومنها تم الوصول إلى صيغة تحسب نسبة التسليح الأصغري تابعة لـ (H, c, f_y, τ_c) وهي:

$$\mu_{\min}(H, c, f_y, \tau_c) = \frac{0.174}{(1-\gamma)} \frac{1+(0.85+2.3\beta_1)^{-1}}{f^*{}_y - \eta_1 \phi} \qquad (5\text{-}61)$$

حيث

$$\beta_1 = \frac{H}{\alpha l_{ch}} \quad , \quad \gamma = \frac{\mathrm{c}}{\mathrm{H}} \quad , \quad \mathrm{f}_\mathrm{y}^* = \frac{f_y}{f_t} \quad , \qquad (5\text{-}62)$$

$$\eta_1 = \left(n \frac{\tau_c}{f_t} p \frac{\alpha l_{ch}}{A_s} \right)^{1/2} \quad , \; \varphi = \left\langle (\beta_1)^{0.25} - 3.61\gamma_1 \right\rangle \quad , \quad \gamma_1 = \gamma\beta_1 = \frac{c}{\alpha l_{ch}}$$

η_1 تؤخذ ضمن المجال [15-50] وذلك لأنه في أغلب الحالات العملية ستكون قيمة η_1 بين هاتين القيمتين.

في حال كان ناتج φ سالباً تؤخذ القيمة مساوية للصفر.

$\alpha=0.5$ للبيتون العادي أو تحسب من العلاقة التالية :

$$\alpha = \frac{65 + 15\, d_{max}/d_o}{170} \qquad (5\text{-}63)$$

حيث :

d_{max} الارتفاع الأعظمي للحصويات المستخدمة.

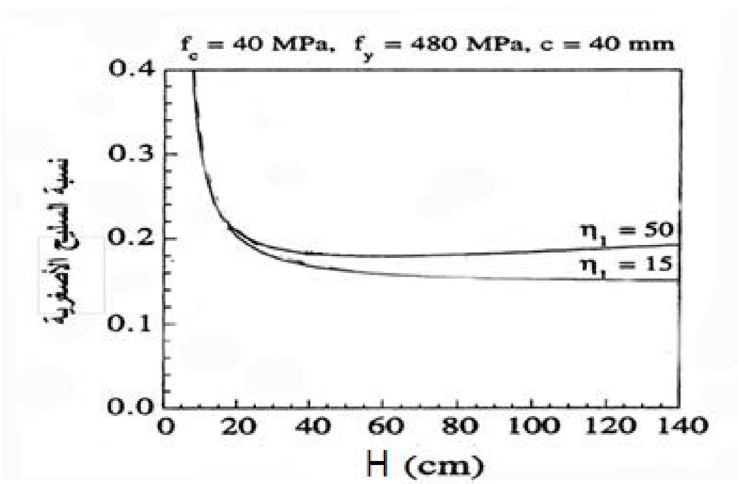
d_0 تؤخذ مساوية لـ 8mm.

تم في الشكل (5−14) رسم منحنيات μ_{min}-H باعتماد العلاقة (5-61) من أجل القيم الموضحة في الجدول (5−1) والمحسوبة اعتماداً على علاقات CEB-FIB [10] وهي:

$$
\begin{aligned}
&f_c = f_{ck} + 8 \quad [\text{MPa}] \\
&f_t = 0.3 f_c^{(2/3)} \\
&G_f = \frac{0.12}{5} f_t \\
&E_c = 9980 \sqrt[3]{f_c}
\end{aligned}
\tag{5-64}
$$

f_{ck} [MPa]	f_c [MPa]	f_t [MPa]	G_f [N/m]	E_c [GPa]	d_{max} [mm]	l_{ch} [mm]	αl_{ch} [mm]
40	48	3.5	90	36	16	264	148

جدول (5−1) البارامترات المعتمدة لحساب نسبة التسليح وفق النموذج الثاني نموذج الطول الفعّال للانزلاق.



الشكل (5−14) نسب التسليح الأصغرية حسب الارتفاع وفق النموذج الثاني [17].

من الشكل(5−14) حيث تم اعتماد القيم التالية (f_c=40MPa, f_y=400MPa, c=40mm) نلاحظ ما يلي:

- قيمة نسبة التسليح الأصغري في حالة التماسك القوي أكبر من قيمة نسبة التسليح الأصغري في حالة التماسك الضعيف.
- تصبح قيمة نسبة التسليح الأصغري μ_{min} ثابتة تقريباً مع زيادة الارتفاع في حالة التماسك الضعيف (η_1=15).
- تزداد قيمة نسبة التسليح الأصغري μ_{min} مع زيادة الارتفاع في حالة التماسك القوي (η_1=50).

وهكذا نرى أنه من خلال هذا النموذج − نموذج الطول الفعّال للانزلاق− تم إدخال عوامل إضافية على نسبة التسليح الأصغرية لا تأخذها الكودات بعين الاعتبار أهمها عامل التماسك، بحيث تزداد قيمة النسبة الأصغرية للتسليح بزيادة قيمة إجهاد التماسك.

5−4 الخلاصة:

قدم هذا الفصل شرحاً توضيحياً لنموذجين نظريين أنتجتهما الدراسات الحديثة يعالجان مسألة تحديد النسبة الأصغرية للتسليح، النموذج الأول هو نموذج ميكانيكية الانكسار الذي يدخل أثر التشقق بعين الاعتبار ويعتبر أن نسبة التسليح الأصغرية هي التي تجعل قيمة عزم الانكسار يزداد مع زيادة عمق الشق ونتيجة لهذا النموذج فإن ارتفاع الجائز يؤثر تأثيراً كبيراً على نسب التسليح الأصغرية.

النموذج الثاني هو نموذج الطول الفعّال للانزلاق الذي يأخذ التماسك بعين الاعتبار و يدخل مساهمة البيتون في تحمل الإجهادات الشادة عند قيمة لعرض الشق أقل من العرض الحرج للشق، ونتيجة لهذا النموذج فإن نسبة التسليح الأصغرية تتأثر بقيمة إجهاد التماسك الذي يحصل عنده الانزلاق.

ونظراً لأن هذه النماذج تدخل عوامل إضافية لا تأخذها الكودات بعين الاعتبار ومنها الكود العربي السوري وتؤثر على قيم النسب الأصغرية للتسليح، سنقوم في الفصل القادم بإجراء مقارنة تمكننا من معرفة الحالات التي يعطي فيها الكود السوري قيماً أعلى من قيم النماذج التي تم توضيحها في هذا الفصل.

الفصل السادس

CHAPTER SIX

مقارنة النماذج النظرية مع الكود العربي السوري

COMPARISON THE THEORETICAL MODELS WITH SYRIAN ARAB CODE

6–1 مقدمة

تعتمد علاقة نسبة التسليح الأصغرية في الكود العربي السوري كباقي الكودات المبدأ الأساسي الذي ينطلق من تحمل التسليح المشدود عزم الانعطاف المسبب لتشكل أول شق بعد حدوثه مباشرة، مع إضافة عوامل أمان تتعلق بطرائق الاستثمار وتكنولوجيا التنفيذ في البلد.

إن النماذج النظرية ومنها النموذجين المعروضين في الفصل السابق أخذا في الحسبان عوامل أخرى إضافة لهذا المبدأ، فمثلاً توصل نموذج ميكانيكية الانكسار إلى أن ارتفاع الجائز عامل مهم يؤثر على قيمة النسبة الأصغرية للتسليح، في حين بيّن النموذج الثاني نموذج الطول الفعّال للانزلاق أن نسبة التسليح الأصغرية تتأثر بقيمة التماسك.

سنجري في هذا الفصل مقارنة بين قيم نسب التسليح الأصغرية وفق هذين النموذجين النظريين والكود العربي السوري لنرى أين هي قيم الكود العربي السوري بالنسبة لقيم هذين النموذجين فيما لو أخذت عواملهما بعين الاعتبار، وذلك من أجل قيم مختلفة لإجهاد الخضوع ومقاومة البيتون على الضغط وسمك التغطية البيتونية.

6–2 البارامترات المعتمدة في المقارنة

تم اعتماد العلاقات (5-64) الواردة في الفصل الخامس لدراسة البارامترات التي تتطلبها النماذج لإيجاد نسبة التسليح الأصغرية وفق علاقاتها، كما تم اعتماد علاقة انخفاض التحمل (softening relation) الموضحة في الشكل(5–8–ب) من الفصل السابق.

يوضح الجدول (6–1) قيم هذه البارامترات من أجل أنواع البيتون المأخوذة في المقارنة.

f'_c	f_t	G_f	E_c
[MPa]	[MPa]	[N/mm]	[GPa]
20	2.2	0.053	32
30	2.9	0.07	34
40	3.5	0.09	36
50	4.1	0.098	38
60	4.6	0.11	40

الجدول(6–1) قيم البارامترات المعتمدة في المقارنة عند تغير f'_c للبيتون.

6-3 مقارنة النموذجين النظريين مع الكود العربي السوري

سيتم المقارنة بين قيم نسب التسليح الأصغرية وفق النموذجين السابقين ووفق الكود العربي السوري من خلال المنحنيات التي تربط الارتفاع مع نسبة التسليح الأصغرية من أجل قيم مختلفة للبارامترات التالية:

- إجهاد خضوع التسليح.
- مقاومة البيتون على الضغط.
- تغطية البيتون للتسليح.

حيث سيتم تغير قيمة بارامتر واحد وتثبيت قيمة البارامتريين الباقيين لمعرفة أين هو موضع قيم الكود العربي السوري من قيم هذه النماذج.

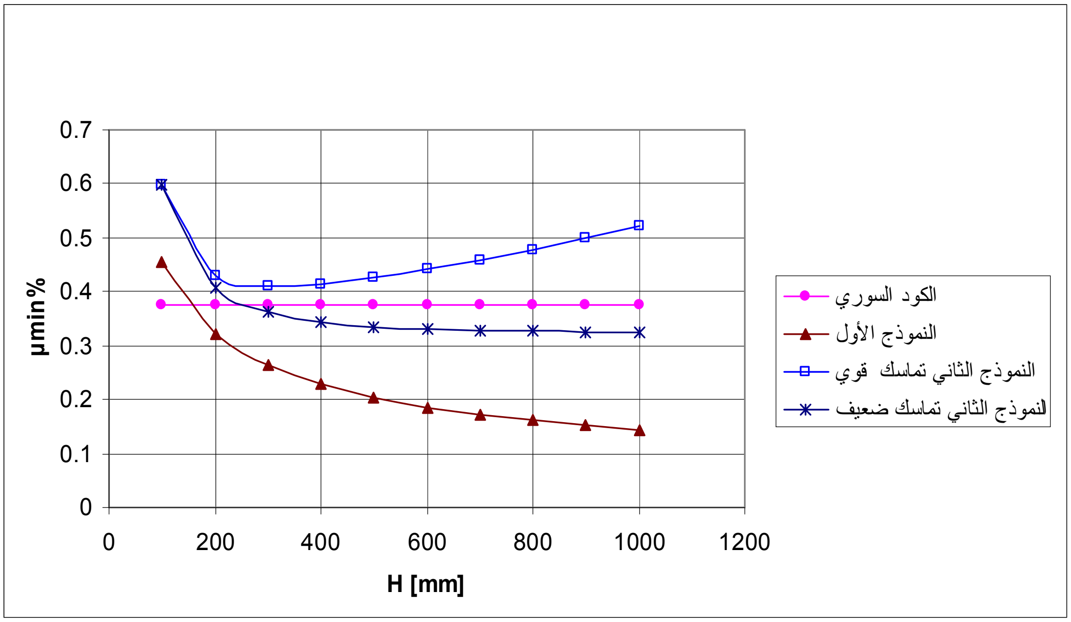
6-3-1 دراسة تأثير إجهاد الخضوع

تُظهر الأشكال (6-1) حتى (6-5) المنحنيات التي تعطينا نسب التسليح المقابلة للارتفاع حسب النموذجين والكود العربي السوري بحيث تم أخذ القيم التالية لإجهاد خضوع التسليح على التوالي:

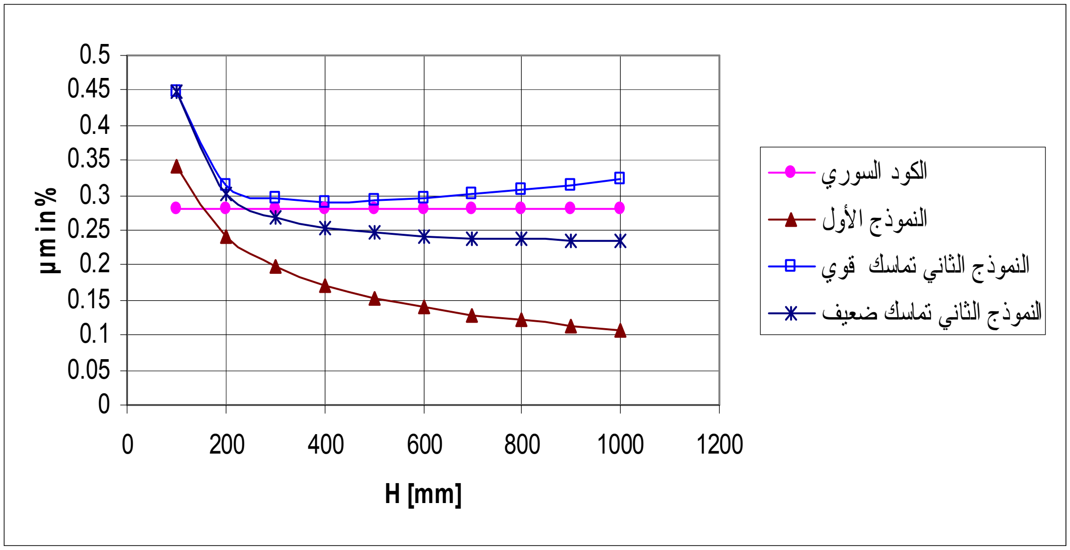
f_y=240,320,400,480,520 MPa

مع تثبيت قيمة مقاومة البيتون على الضغط وتغطية البيتون للتسليح عند القيم التالية:

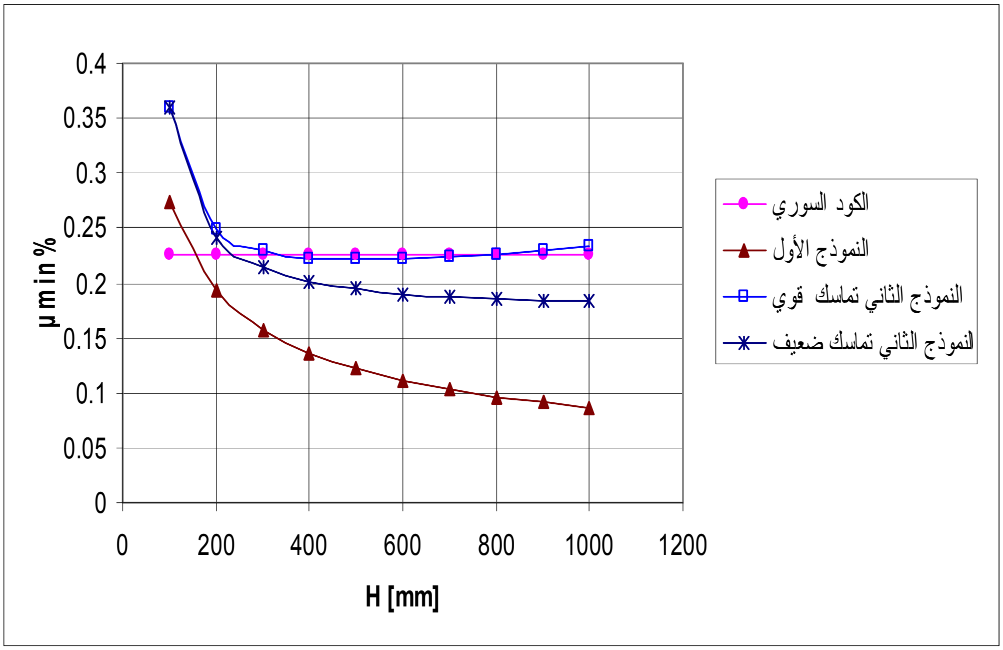
$f`_c$=40MPa , c=40 mm



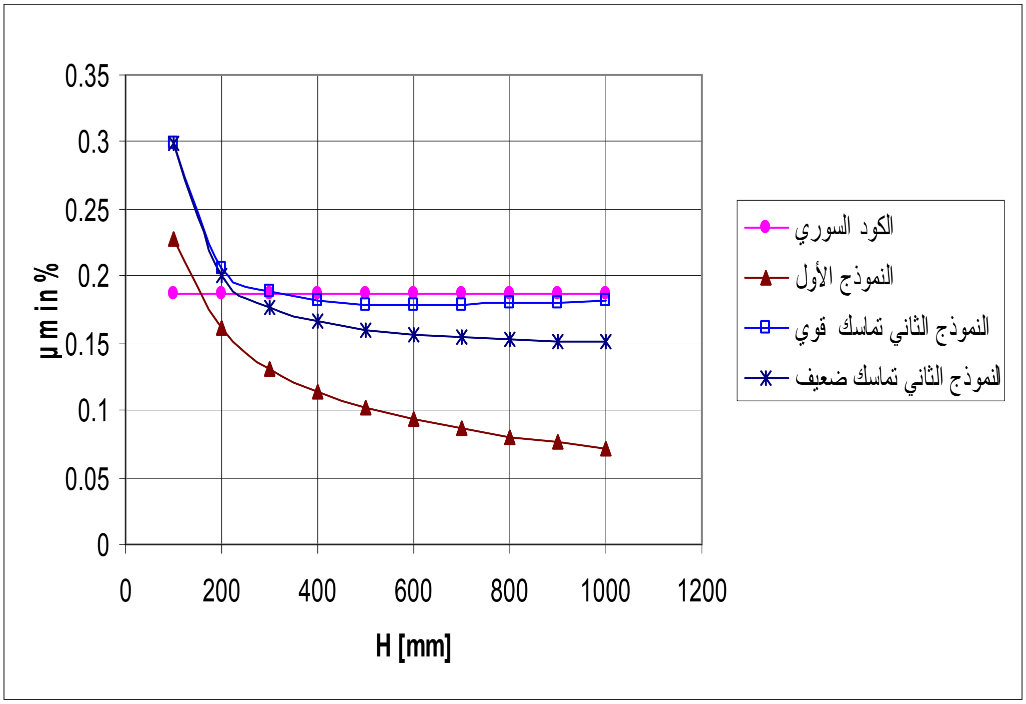
الشكل (6−1) نسب التسليح الأصغري وفق الكود السوري والنماذج النظرية المدروسة
fc`=40 MPa, fy=240 MPa, c=40 mm



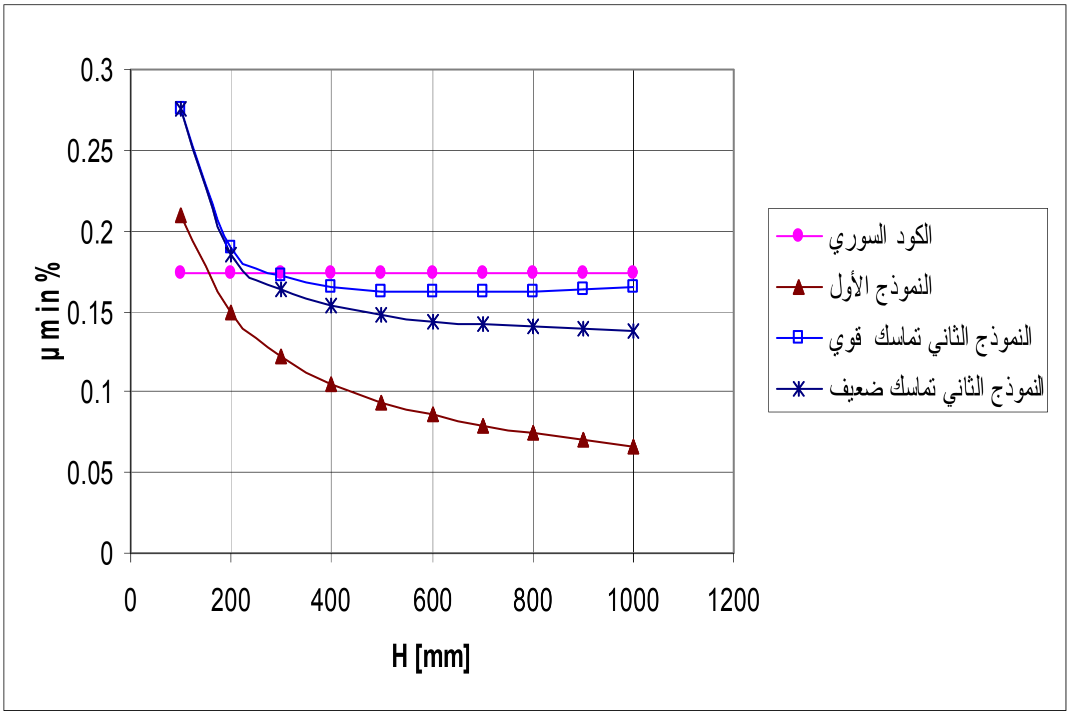
الشكل (6−2) نسب التسليح الأصغري وفق الكود السوري والنماذج النظرية المدروسة
fc`=40 MPa, fy=320 MPa, c=40 mm



الشكل (6–3) نسب التسليح الأصغري وفق الكود السوري والنماذج النظرية المدروسة
fc`=40 MPa, fy=400 MPa, c=40 mm



الشكل (6–4) نسب التسليح الأصغري وفق الكود السوري والنماذج النظرية المدروسة
fc`=40 MPa, fy=480 MPa, c=40 mm



الشكل (5−6) نسب التسليح الأصغري وفق الكود السوري والنماذج النظرية المدروسة
fc`=40 MPa, fy=520 MPa, c=40 mm

من خلال مقارنة الأشكال السابقة نستنتج ما يلي :

- تنقص قيم μ_{min} مع زيادة f_y من أجل النموذجين والكود العربي السوري.
- إن قيم μ_{min} للنموذج الأول أصغر من قيم μ_{min} للكود العربي السوري ويزداد الفارق مع زيادة الارتفاع.
- إن قيم μ_{min} للنموذج الثاني حالة التماسك الضعيف أصغر من قيم μ_{min} للكود السوري مع فارق ثابت تقريباً عند زيادة الارتفاع لأن قيم μ_{min} تثبت تقريباً مع زيادة الارتفاع في حالة التماسك الضعيف.
- إن وضع قيم μ_{min} للنموذج الثاني حالة التماسك القوي تتأثر بشكل واضح بقيم إجهاد خضوع التسليح، فمن أجل قيم صغيرة لـه (f_y=240MPa) تكون قيم μ_{min} للنموذج الثاني حالة التماسك القوي أكبر بشكل واضح من قيم μ_{min} للكود السوري، ومع زيادة f_y تقترب من قيم الكود حتى تنطبق تقريباً عليه (f_y=400MPa) ثم تصبح أصغر من قيم الكود عند قيم مرتفعة نسبياً لـ f_y (f_y=520MPa).
- تصبح قيم النسبة الأصغرية للتسليح وفق الكود العربي السوري أكبر من قيم كلا النموذجين عند قيم لإجهاد خضوع التسليح أكبر من 400[MPa].

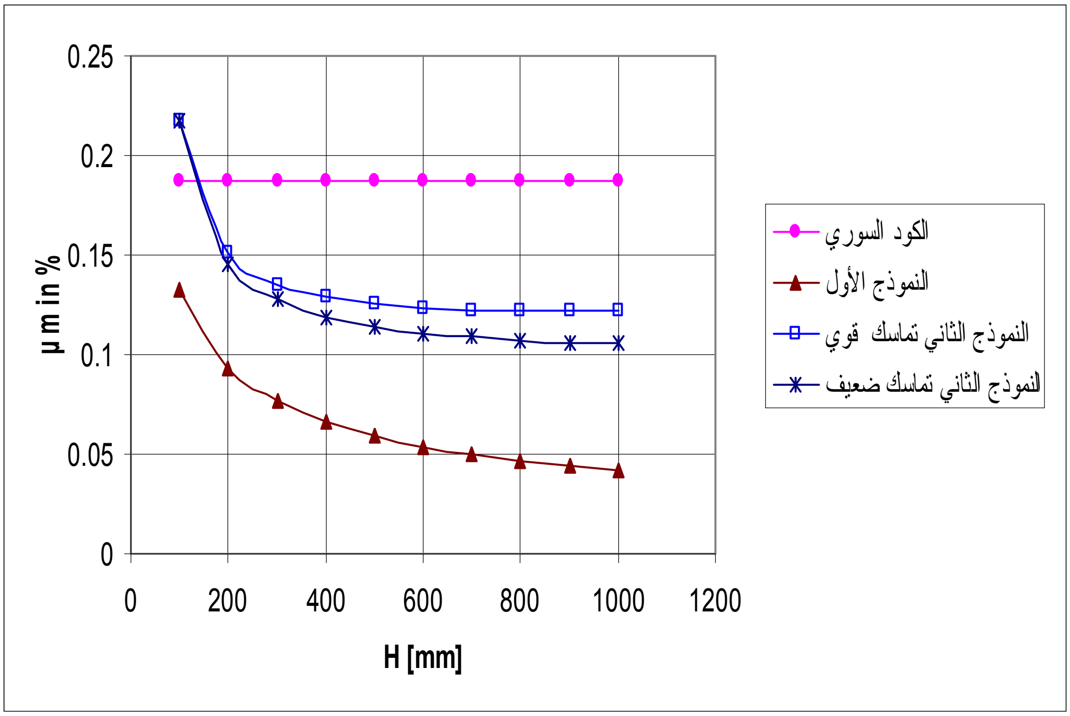
6-3-2 دراسة تأثير مقاومة البيتون على الضغط

إن الأشكال (6-6) وحتى (6-10) تظهر المنحنيات التي تعطينا نسب التسليح المقابلة للارتفاع حسب النموذجين والكود العربي السوري بحيث تم أخذ القيم التالية لمقاومة البيتون على الضغط على التوالي:

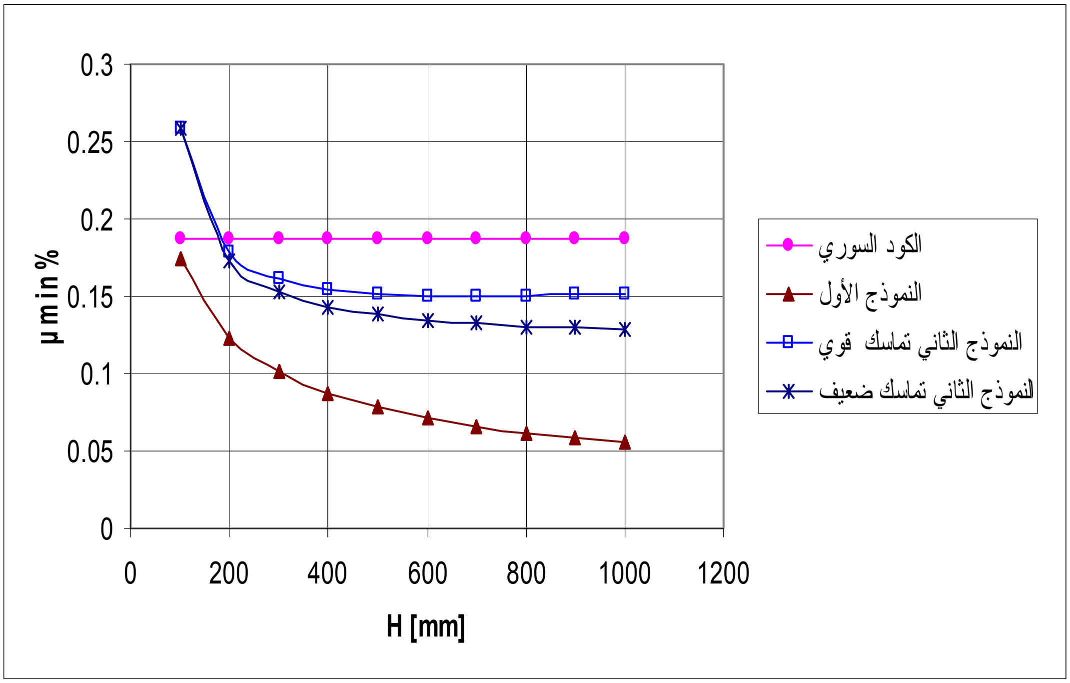
$f`_c$=20, 30, 40, 50, 60 MPa

وتم من أجل جميع المنحنيات تثبيت قيمة إجهاد خضوع التسليح وتغطية البيتون للتسليح عند القيم التالية:

f_y=480MPa , c = 40 mm

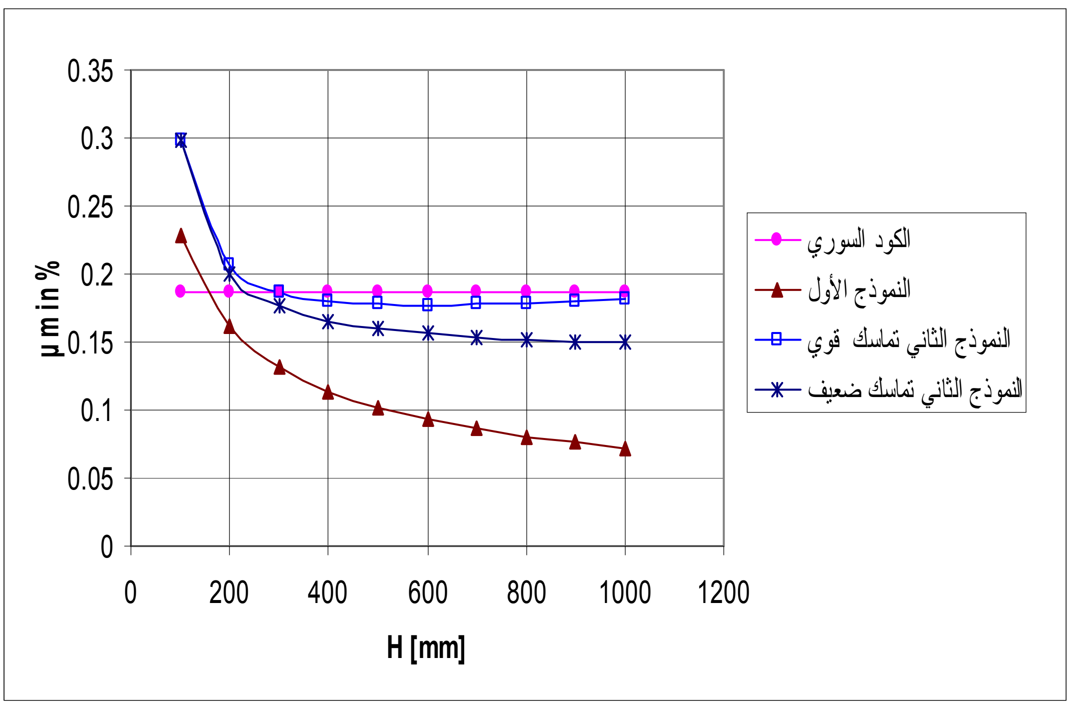


الشكل (6-6)نسب التسليح الأصغري وفق الكود السوري والنماذج النظرية المدروسة
fc`=20 MPa, fy=480 MPa, c=40 mm



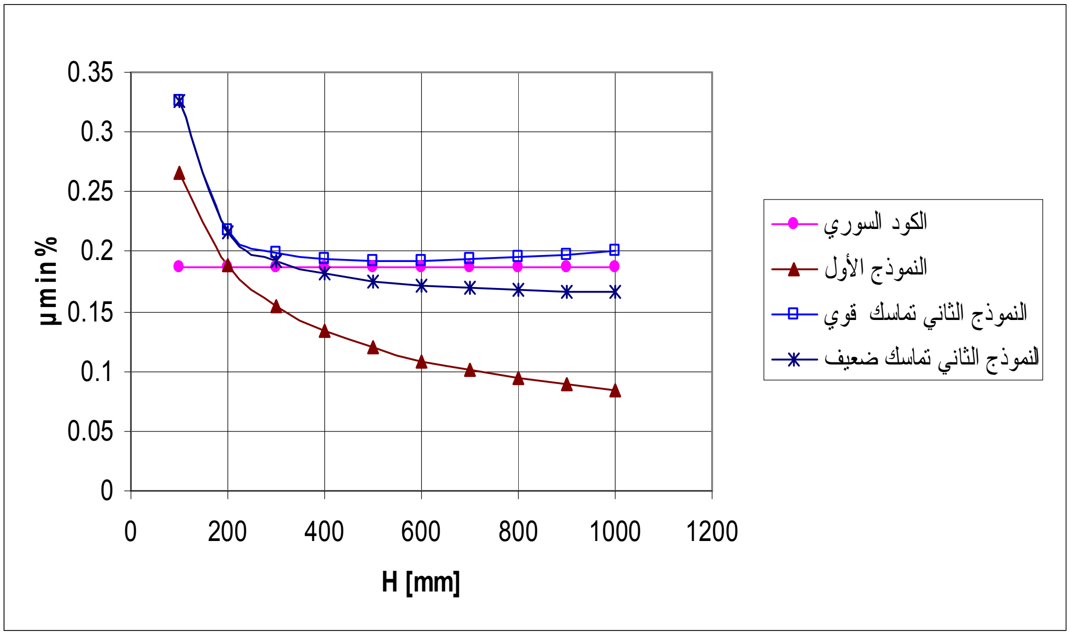
الشكل (6−7) نسب التسليح الأصغري وفق الكود السوري والنماذج النظرية المدروسة

fc`=30 MPa, fy=480 MPa, c=40 mm

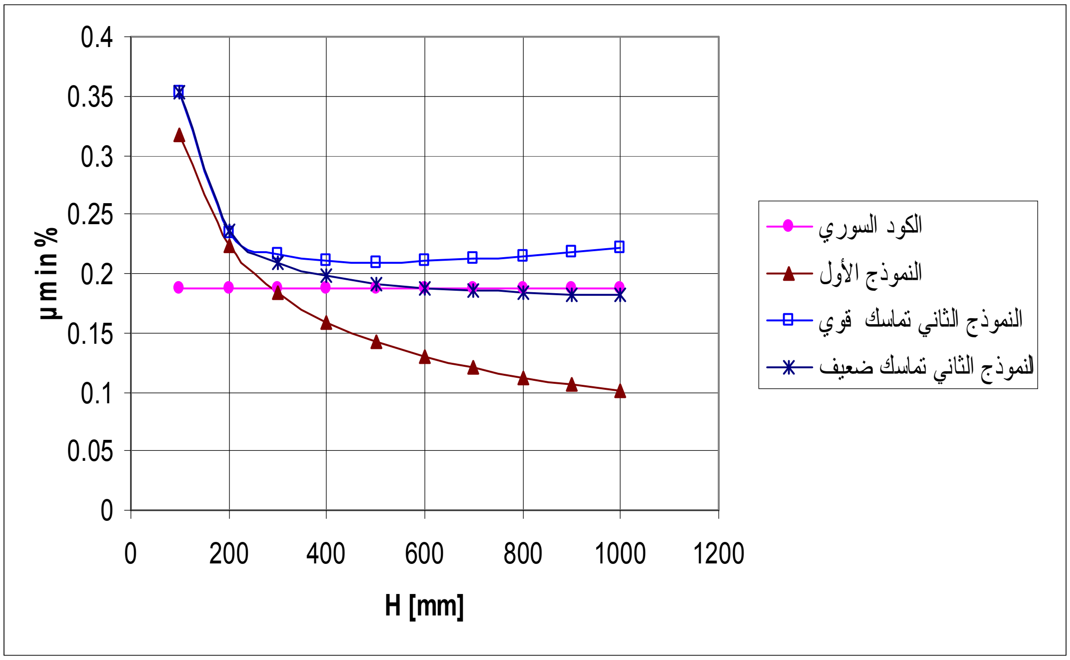


الشكل (6−8) نسب التسليح الأصغري وفق الكود السوري والنماذج النظرية المدروسة

f`c=40 MPa, fy=480 MPa, c =40 mm



الشكل(6−9) نسب التسليح الأصغري وفق الكود السوري والنماذج النظرية المدروسة
fc`=50 MPa, fy=480 MPa, c=40 mm



الشكل(6−10) نسب التسليح الأصغري وفق الكود السوري والنماذج النظرية المدروسة
f`c=60 MPa, fy=480 MPa, c=40 mm

من خلال مقارنة الأشكال السابقة نستنتج ما يلي:

- إن قيم نسب التسليح الأصغرية وفق الكود العربي السوري أكبر بشكل واضح من قيم باقي النماذج عند قيم لمقاومة البيتون على الضغط أقل من 40 [MPa].
- تزداد قيم نسبة التسليح الأصغري وفق كلا النموذجين مع زيادة $f`_c$.
- لا تتأثر قيم نسبة التسليح الأصغري حسب الكود العربي السوري بتغير قيمة $f`_c$.
- تبقى قيم التسليح الأصغري للنموذج الأول أصغر من قيم التسليح الأصغري للكود السوري كذلك الأمر بالنسبة للنموذج الثاني حالة التماسك الضعيف، أما من أجل النموذج الثاني حالة التماسك القوي فتقترب قيم التسليح الأصغري من قيم الكود السوري حتى تتجاوزها عند ($f`_c$=50MPa) .

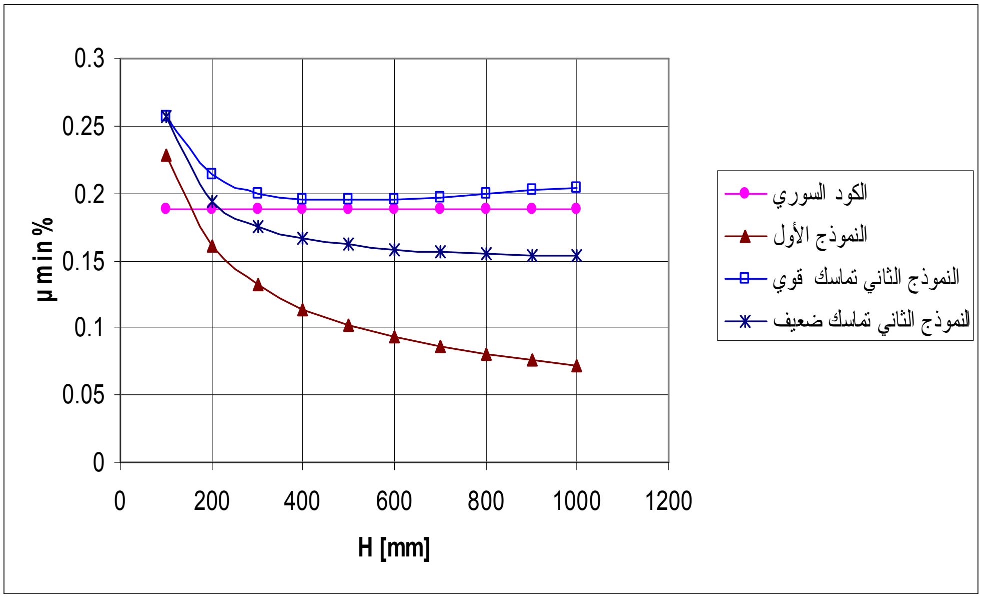
6-3-3 دراسة تأثير تغطية البيتون للتسليح

إن الأشكال (6-11) وحتى (6-14) تظهر المنحنيات التي تعطينا نسب التسليح المقابلة للارتفاع حسب النموذجين والكود العربي السوري بحيث تم أخذ القيم التالية للتغطية على التوالي:

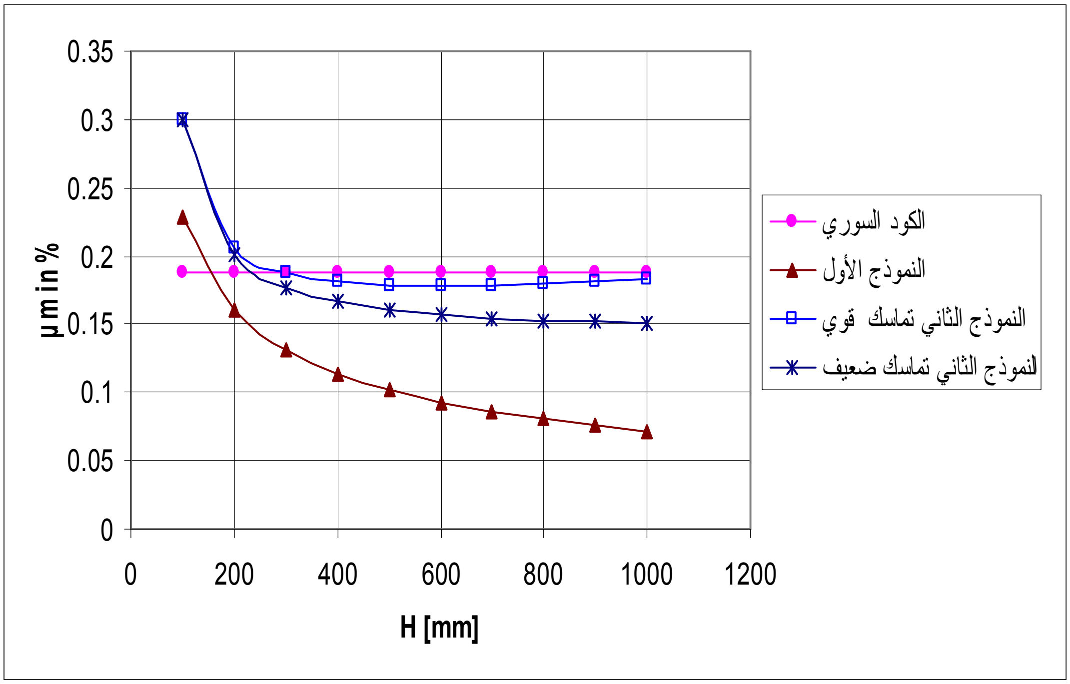
c= 30, 40, 50, 80 mm

وتم من أجل جميع المنحنيات تثبيت قيمة إجهاد خضوع التسليح ومقاومة البيتون على الضغط عند القيم التالية:

f_y=480MPa , $f`_c$ = 40 MPa

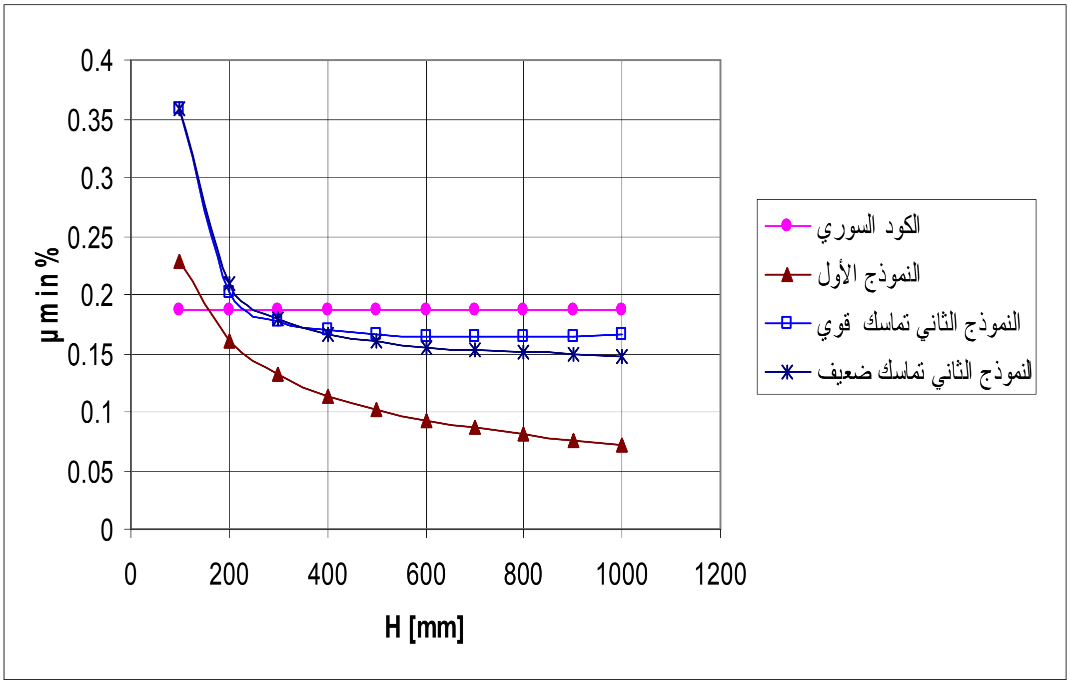


الشكل (6-11) نسب التسليح الأصغري وفق الكود السوري والنماذج النظرية المدروسة
fc`=40 MPa, fy=480 MPa, c=30 mm



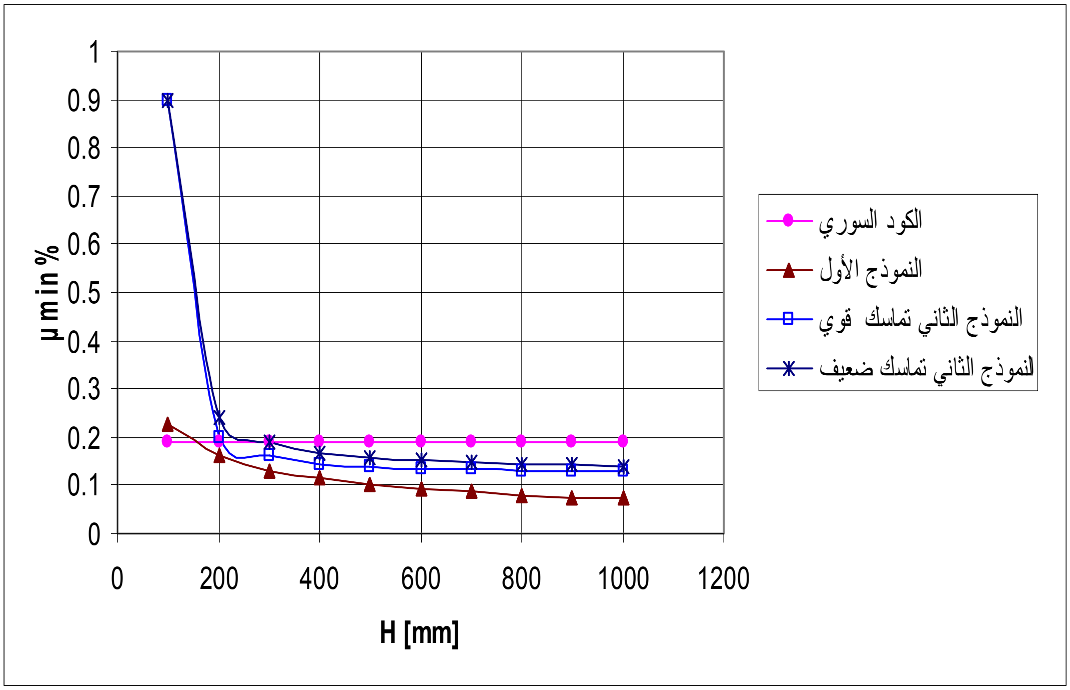
الشكل (6−12) نسب التسليح الأصغري وفق الكود السوري والنماذج النظرية المدروسة

fc`=40 MPa, fy=480 MPa, c=40 mm



الشكل (6−13) نسب التسليح الأصغري وفق الكود السوري والنماذج النظرية المدروسة

fc`=40 MPa, fy=480 MPa, c=50 mm



الشكل (6-14) نسب التسليح الأصغري وفق الكود السوري والنماذج النظرية المدروسة
fc`=40 MPa, fy=480 MPa, c=80 mm

من خلال مقارنة الأشكال السابقة نجد ما يلي :

- إن تغير قيم التغطية c تؤثر فقط على قيم النموذج الثاني حالة التماسك القوي.
- تقل قيم μ_{min} لحالة التماسك القوي مع زيادة قيم التغطية c.
- تكون قيم μ_{min} لحالة التماسك القوي أكبر من قيم μ_{min} للكود السوري عند قيم صغيرة للتغطية (c=30mm) ومع زيادة قيمة التغطية تقترب قيم μ_{min} لحالة التماسك القوي من قيم μ_{min} الكود السوري حتى تصبح أصغر منه من أجل (c=50mm).
- يتناقص الفارق بين قيم μ_{min} لحالة التماسك الضعيف والتماسك القوي حتى ينطبقا تقريباً من أجل قيم مرتفعة لـ c (c=80mm).
- تصبح قيم النسبة الأصغرية للتسليح وفق الكود العربي أكبر من قيم كلا النموذجين عند قيم لتغطية البيتون للتسليح أكبر من [mm] 40.

نلاحظ مما سبق أن قيم نسبة التسليح الأصغرية وفق الكود العربي السوري أعلى من قيم كلا النموذجين عند الحالات التالية:

- عندما تكون قيم مقاومة البيتون على الضغط أقل من [MPa] 40.
- عندما يكون إجهاد خضوع التسليح أكبر من [MPa] 400.
- عند قيم للتغطية أكبر أو تساوي [cm] 4.

إن الحالات السابقة التي تم ذكرها حيث قيم الكود العربي السوري أكبر من قيم النماذج هي الحالات التي غالباً ما نصادفها أثناء تصميم الجوائز البيتونية على الانعطاف، مما يستدعي تخفيض نسبة التسليح الأصغرية عند هذه الحالات عما هوو ارد في الكود العربي السوري.

4-6 الخلاصة:

تم في هذا الفصل مقارنة نسب التسليح الأصغرية وفق نموذج ميكانيكية الانكسار ونموذج الطوللفع ّ ال للانزلاق ووفق الكود العربي السوري وتبين أنه في حالات معينة يعطي الكود العربي السوري قيماً أكبر بشكل واضح من قيم النماذج، الأمر الذي يستدعي إجراء دراسات نظرية وتجريبية قادمة تبحث في تخفيض نسبة التسليح الأصغرية المحددة من قبل الكود العربي السوري عن هذه الحالات.

الفصل السابع
CHAPTER SEVEN

نمذجة حالات مختبرة في دراسات تجريبية باستخدام برنامج *ABAQUS*

MODELING TESTED CASES IN EXPERIMENTAL STUDIES BY USING ABAQUS PROGRAM

7-1 مقدمة

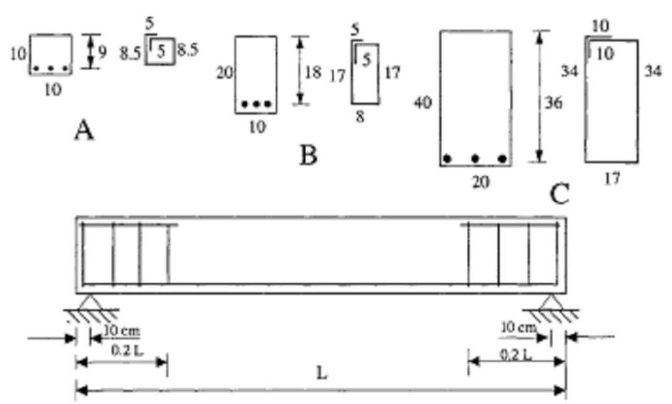
يعتمد نموذج ميكانيكية الانكسار الذي تم شرحه في الفصل الخامس معيار عدد الهشاشة لتحديد نسبة التسليح الأصغرية وشكل الانهيار، ولمعرفة مدى صحة هذا النموذج أجرى معد البحث تجارب على جوائز بيتونية تختلف عن بعضها بالارتفاع، النحافة، ونسبة التسليح وتمكن من خلال النتائج من التحقق من صحة ما جاء به.

سيتم في هذا الفصل عرض الدراسة التجريبية مع نتائجها، وكذلك طريقة نمذجة الحالات المختبرة في هذه الدراسة باستخدام برنامج ABAQUS مع مقارنة النتائج.

7-2 الدراسة التجريبية [8]

7-2-1 الجوائز المختبرة

أجري في department of structural engineering of politecnico di torino اختبارات على جوائز بيتونية بسيطة الاستناد كما هو مبين بالشكل (7-1)



الشكل (7-1) مقاطع الجوائز المختبرة [8].

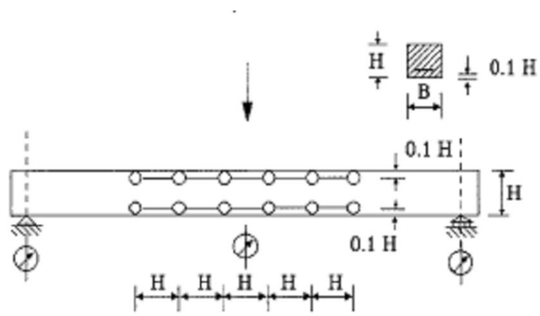
الجوائز المختبرة تقسم إلى ثلاثة مجموعات حسب مقطع الجائز:

- المجموعة الأولى A المقطع العرضي لها mm^2 (100×100).
- المجموعة الثانية B المقطع العرضي لها mm^2 (100×200).
- المجموعة الثالثة C المقطع العرضي لها mm^2 (200×400).

من أجل كل مجموعة تم أخذ نسب النحافة التالية L/h=6,12,18، كما تم أخذ نسبة الارتفاع الفعال إلى الارتفاع الكلي للجائز مساوية لـ 0.9. تم تسليح الجوائز في منطقة الشد بثلاثة نسب

مختلفة 0.5% ,0.25%, 0.12%. كل الجوائز تم صبها من نفس الخلطة ولم يتم وضع تسليح قص في الجزء الوسطي من الجوائز.

نتيجة لقلة التسليح في الجوائز تم استخدام طريقة التحكم بالمسافة الفاصلة بين وجهي الشق عند فم الشق (crack mouth opening displacement) حتى يتم تجنب الانهيار المفاجئ. تم وضع مقاييس لقياس التشوهات أطولها مساوية لعرض الجائز عند 1/10 من ارتفاع الجائز في أعلى وأسفل امتداد الجائز، وتم وضع جهازين عند المساند وجهاز آخر عند المنتصف من أجل قياس الانتقال الشاقولي الفعلي بطرح وسطي الانتقال عند المساند من وسطي الانتقال عند منتصف الجائز مكان تطبيق الحمولة الشكل(7−2).



الشكل (7−2) توزيع المقاييس على الجائز [8].

f_{cm} [N/mm^2]	E_c [N/mm^2]	G_f [N/mm]	K_{1c} [N/mm$^{3/2}$]	N_{pc}
48.2	35,000	0.115	63.4	0.211

الجدول (7−1) قيم البارمترات المعتمدة في إيجاد النتائج التجريبية.

إن الجدول (7−1) يبين قيم البارمترات التجريبية، حيث تم الحصول على مقاومة البيتون الوسطية على الضغط من ثمانية عينات مكعبية طول ضلعها 100 mm، كما تم تحديد الطاقة المتحررة عند انهيار البيتون G_f من ستة عينات حسب توصيات RILEM [8] ومنها يمكن حساب معامل شدة الإجهاد من العلاقة:

$$K_{1c} = \sqrt{G_f E}$$

تمفي الجدول أيضاً إضافة عدد الهشاشة الحدي N_{pc} الذي يعتبره النموذج الأول – تم عرضه سابقاً في الفصل الخامس – القيمة الانتقالية بين الانهيار الهش والانهيار اللدن بحيث:

- الانهيار هشاً عندما $N_p < N_{pc}$.
- الانهيار لدناً عندما $N_p \geq N_{pc}$.

$$N_{pc} = 0.1 + 0.0023 f_c^{`}$$

حيث:

$$N_p = \frac{f_y h^{0.5}}{K_{1c}} \frac{A_s}{A_c}$$

إن قيم إجهاد الخضوع للفولاذ تختلف باختلاف القطر المستخدم لقضبان التسليح، في هذه الدراسة تم استخدام قضبان بقطر 5mm و8mm و16mm وا جهاد الخضوع لهم $604 N/mm^2$ و $643 N/mm^2$ و $518 N/mm^2$ على الترتيب. إن الجدول (7–2) يوضح عدد وقطر القضبان المستخدمة وكذلك نسبة التسليح مع عدد الهشاشة المقابل لكل مقطع من مقاطع الجوائز المختبرة. تجدر الإشارة إلى أن نسب التسليح 0.12% و 0.25% للمجموعة الأولى A يتطلب قطر 4mm لقضبان التسليح ونتيجة لعدم توفره تم استخدام قضبان بقطر 5mm وا يجاد نسب التسليح الموافقة.

المقطع [mm]	الجائز	النحافةL/h	تسليح الشد	Np	نسبة التسليح
A100×100	A12-06	6	1φ5	0.187	0.20%
	A25-06	6	2φ5	0.374	0.39%
	A12-12	12	1φ5	0.187	0.20%
	A25-12	12	2φ5	0.374	0.39%
	A50-12	12	1φ8	0.510	0.50%
	A25-18	18	2φ5	0.374	0.39%
	A50-18	18	1φ8	0.510	0.50%
B100×200	B25-06	6	1φ8	0.360	0.25%
	B50-06	6	2φ8	0.721	0.50%
	B25-12	12	1φ8	0.360	0.25%
C 200×400	C12-06	6	2φ8	0.225	0.12%
	C25-06	6	4φ8	0.510	0.25%
	C50-06	6	2φ16	0.821	0.50%
	C12-12	12	2φ8	0.225	0.12%
	C50-18	18	2φ16	0.821	0.50%

الجدول (7–2) مواصفات الجوائز المختبرة [8].

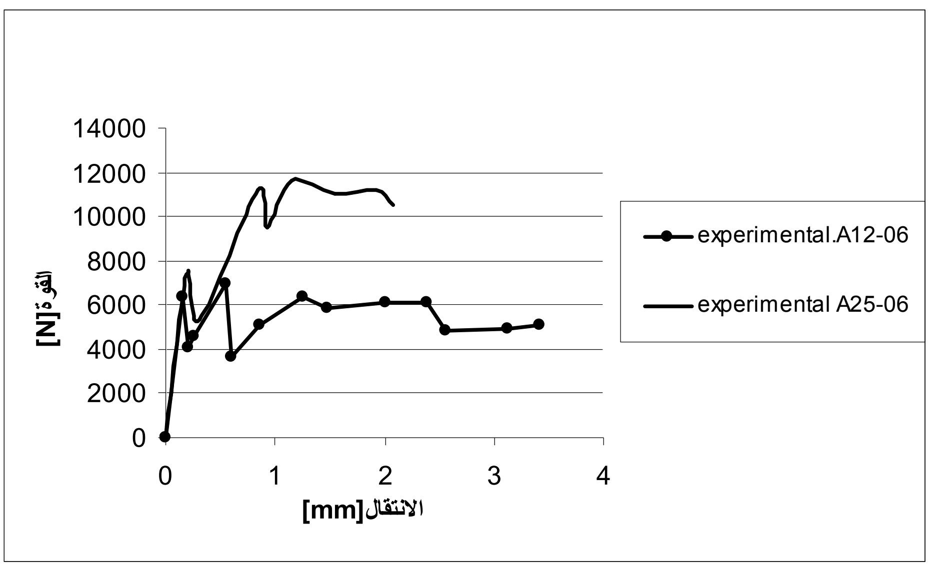
نلاحظ من الجدول (7−2) أن عدد الهشاشة N_p للجائزين A12-06 و A12-12 أقل من عدد الهشاشة الحدي N_{pc}=0.211 المدرج في الجدول (7−1) وبالتالي فإن انهيارهما سيكون هشاً حسب ما جاء به النموذج الأول وهذا ما ستؤكده النتائج التجريبية كما سنرى في الفقرة القادمة.

7−2−2 النتائج التجريبية

اعتماداً على معطيات التجارب تم رسم منحنيات قوة – انتقال التي تعطينا القوة التي يتحملها الجائز مع الانتقال الشاقولي المقابل عند منتصف الجائز من أجل كل جائز من الجوائز الموضحة في الجدول (7−2) وكانت النتائج بالشكل التالي:

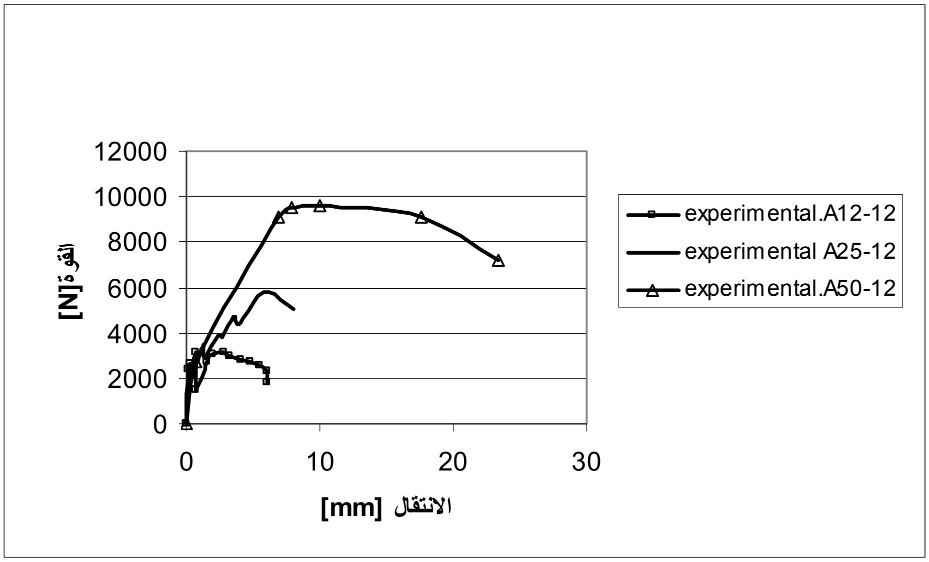
- من أجل المجموعة الأولى A 100×100 mm نجد مايلي:

– عند نحافة L/h=6 شكل (7−3) فإن الجائز A12-06 يبدي سلوكاً غير مستقراً وشكل الانهيار هش، في حين أن الجائز A25-06 يسلك سلوكاً مستقراً وشكل انهياره لدناً .



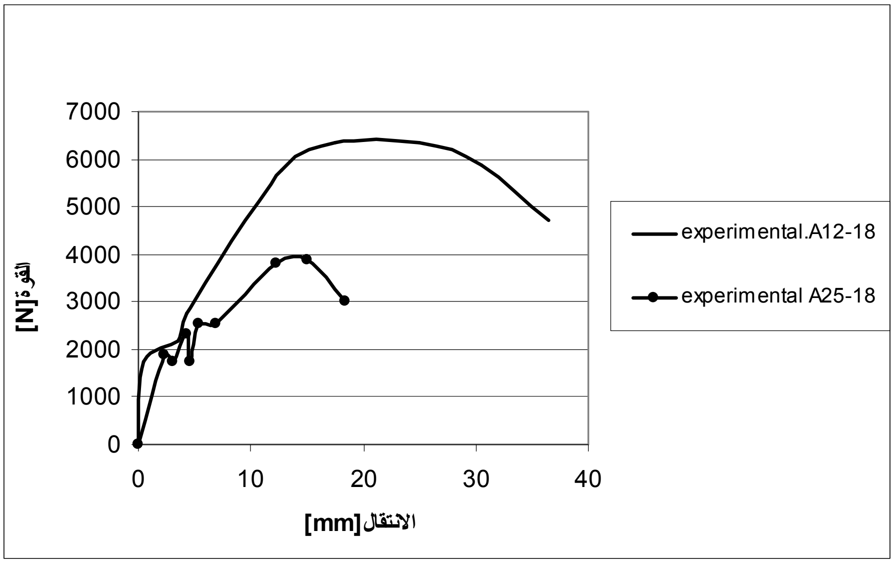
الشكل(7−3) منحنيات قوة – انتقال للجوائز ذات المقطع A ونحافة 6 مع تغير قيمة نسبة التسليح [8].

- عند نحافة L/h=12 شكل (7-4) فإن الجائز A12-12 يبدي سلوكاً غير مستقراً وشكل الانهيار هش، والجائزين A25-12 و A50-12 يسلكان سلوكاً مستقراً وشكل انهيارهما لدناً .



الشكل(7-4) منحنيات قوة – انتقال للجوائز ذات المقطع A ونحافة 12 مع تغير قيمة نسبة التسليح [8].

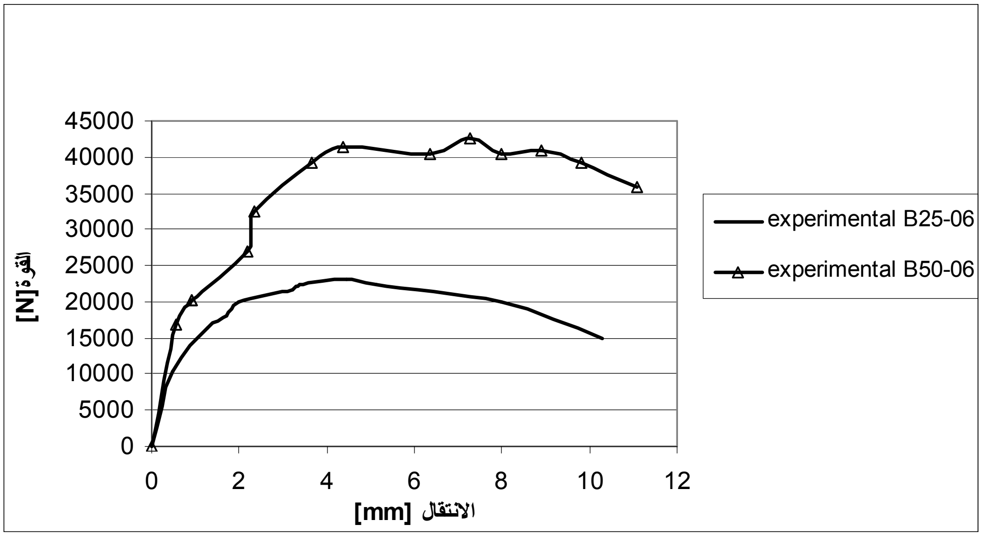
- عند نحافة L/h=18 شكل (7-5) فإن الجائزين A12-18 و A25-18 يبديان سلوكاً مستقراً وشكل انهيارهما لدناً .



الشكل(7-5) منحنيات قوة – انتقال للجوائز ذات المقطع A ونحافة 18 مع تغير قيمة نسبة التسليح [8].

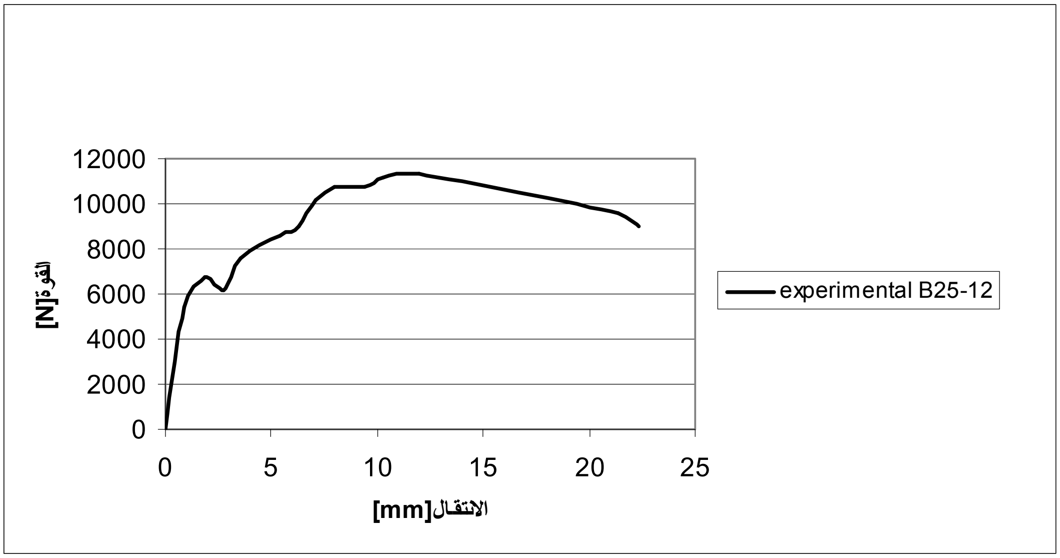
• من أجل المجموعة الثانية B 100×200 mm نجد مايلي:

– عند نحافة L/h=6 شكل (7−6) فإن الجائزين B25-06 و B50-06يبديان سلوكاً مستقراً وشكل الانهيار لدناً .



الشكل(7−6) منحنيات قوة – انتقال للجوائز ذات المقطع B ونحافة 6 مع تغير قيمة نسبة التسليح [8].

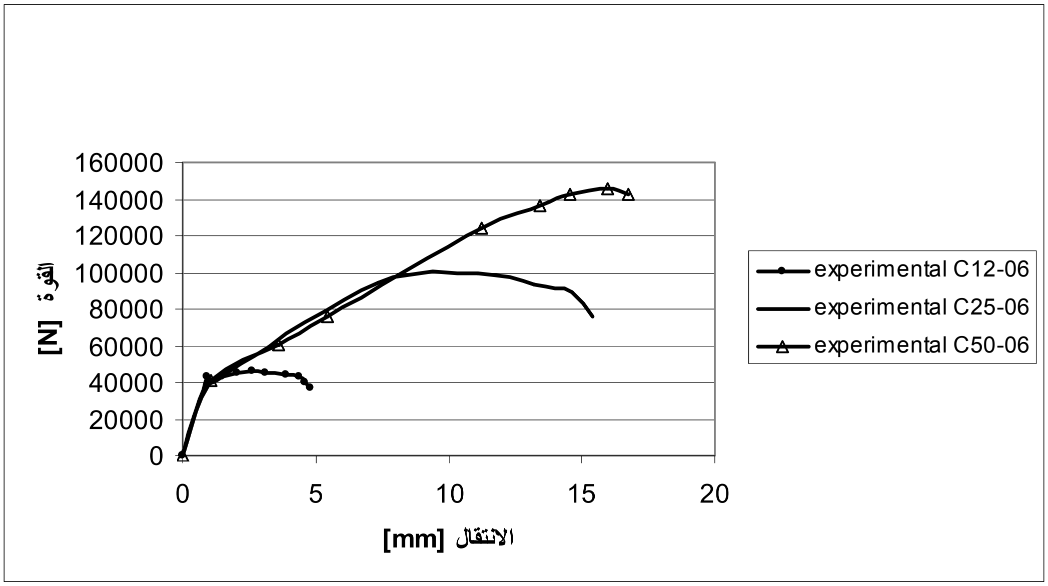
– عند نحافة L/h=12 شكل (7−7) فإن الجائز B25-12 يبدي سلوكاً مستقراً وشكل الانهيار لدناً .



الشكل(7−7) منحنيات قوة – انتقال للجوائز ذات المقطع B ونحافة 12 مع نسبة تسليح 0.25% [8].

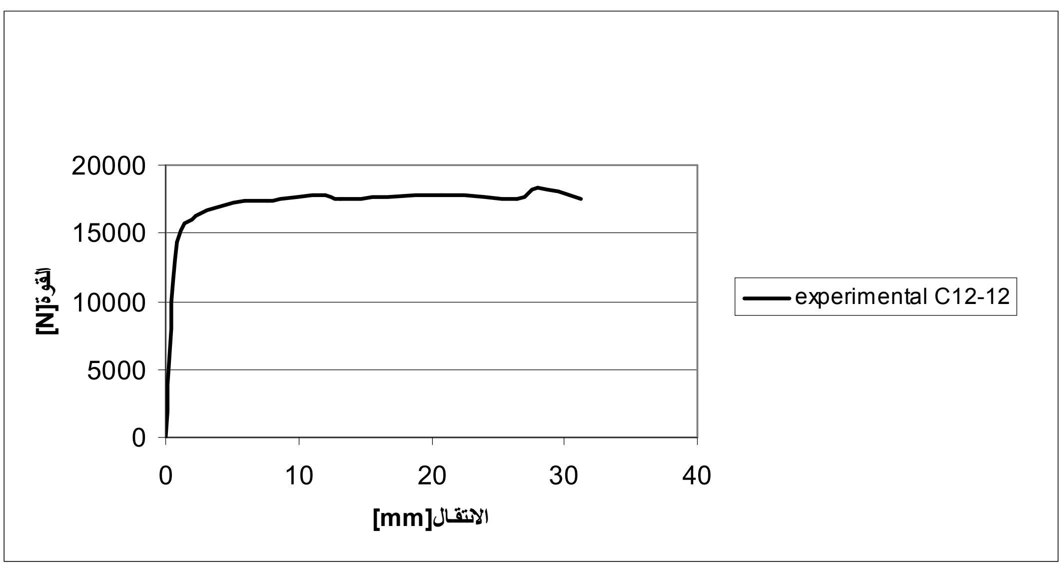
- من أجل المجموعة الثالثة C 100×100 mm نجد مايلي:

- عند نحافة L/h=6 شكل (7–8) فإن جميع الجوائز C12-06 و C25-06 و C50-06 تسلك سلوكاً مستقراً وشكل انهيارها لدناً .



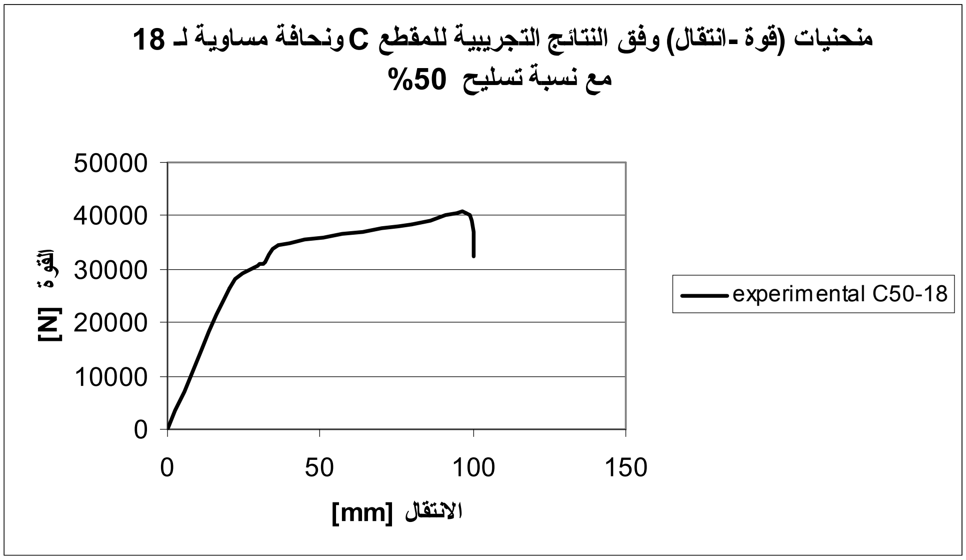
الشكل(7–8) منحنيات قوة – انتقال للجوائز ذات المقطع C ونحافة 6 مع تغير قيمة نسبة التسليح [8].

- عند نحافة L/h=12 شكل (7–9) فإن الجائز C12-12يبدي سلوكاً مستقراً وشكل الانهيار لدناً .



الشكل(7–9) منحنيات قوة – انتقال للجوائز ذات المقطع C ونحافة 12 مع نسبة تسليح 0.12% [8].

- وأخيراً عند نحافة L/h=18 شكل (7−10) فإن الجائز C50-18 أيضا يبدي سلوكاً مستقراً وشكل انهياره لدناً .



الشكل(7−10) منحنيات قوة – انتقال للجوائز ذات المقطع C ونحافة 18 مع نسبة تسليح 0.50% [8].

وبالتالي مما سبق نجد أن النتائج التجريبية أتت موافقة لما جاء به النموذج الأول من حيث التنبؤ بسلوك الجائز وشكل الانهيار وكذلك تحديد نسبة التسليح اللازم وضعها في الجائز لتفادي الانهيار الهش والمفاجئ.

7-3 نمذجة الجوائز المدروسة تجريبياً باستخدام برنامج ABAQUS

يتوفّر الآن عدد كبير من البرامج الحاسوبية مع قدرة على تحليل العناصر المحدودة لأنظمة هندسية مختلفة. وهي تساعد في حل العديد من المسائل من التحليل الستاتيكي الخطي البسيط إلى التحليل اللاخطي. تملك بعض هذه البرامج مثل ANSYS و ABAQUS و DIANA مقدرة خاصة في تحليل المواد المركّبة.

وقد تمّ اختيار برنامج العناصر المحدودة ABAQUS لإيجاد شكل استجابة الجوائز البيتونية المسلحة بتسليح قليل وأهم ما يميّز هذا البرنامج وجود مكتبة ضخمة للمواد، نماذج مادية مختلفة، قابلية التماس (CONTACT) وقدرة التحليل اللاخطي........إلخ.

سيتم فيما يلي إعطاء شرح عن هذا البرنامج والمبادئ المعتمدة فيه، ثم سيتم إجراء تحليل إنشائي من خلال برنامج ABAQUS لتحديد شكل استجابة الجوائز المدروسة تجريبياً والموضحة في الجدول (7-2) بعد ذلك سيتم مقارنة منحنيات قوة – انتقال الناتجة عن هذا البرنامج مع المنحنيات التي تم الحصول عليها تجريبياً .

7-3-1 لمحة عن برنامج ABAQUS6.5 [4]



الشكل(7-11) البرنامج المستخدم ABAQUS 6.5 [4].

يسمح هذا البرنامج بنمذجة أكثر المواد الهندسية كالمعادن، الترب الحبيبية، الصخور، البيتون، والبيتون المسلح .... إلخ.

يضم هذا البرنامج أربعة برامج فرعية وهي:

1. ABAQUS/STANDARD: يستخدم في تحليل معظم المسائل سواء منها الخطية أو اللاخطية، الستاتيكية أو الديناميكية وغيرها.

2. ABAQUS/EXPLICIT: يستخدم في التحليل الديناميكي بشكل أساسي.

3. ABAQUS/CAE: هو الواجهة الرسومية للبرنامج والتي يتم فيها إنشاء نموذج العناصر المحدودة وربط الملفات البرمجية (input file) مع البرنامج.

4. ABAQUS/VIEWER: يستخدم في عرض النتائج المستخلصة من ABAQUS/STANDARD و ABAQUS/EXPLICIT

تم اعتماد برنامج ABAQUS/STANDARD لذلك سيتم التوسع في شرح الأمور المتعلقة بهذا البرنامج والتي تم استخدامها أثناء النمذجة.

7-3-1-1 ملف العبارات البرمجية (INPUT FILE)

إن ملف العبارات البرمجية (INPUT FILE) هو ملف بيانات يمكن إنشاؤه أو تعديله من خلال محرر نصوص عادي، ويحتوي هذا الملف (INPUT FILE) مجموعتين أساسيتين من المعلومات هما: MODEL DATA و HISTORY DATA شكل (7-12)

- :MODEL DATA

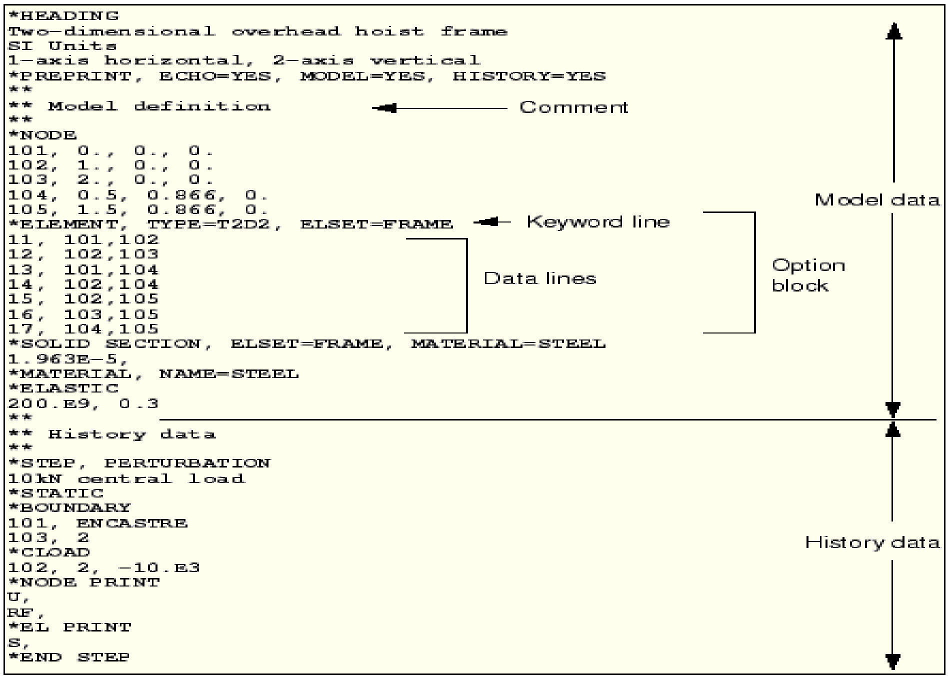
وهو يتألّف من المعلومات الخاصة بالنموذج مثل:

- شكل النموذج: من خلال وصف العناصر والعقد.
- تعريف المواد: وربط هذه المواد مع العناصر.

ويمكن أن نجد معلومات أخرى اختيارية يمكن أن تدخل في MODEL DATA ونذكر منها:

- الشروط البدائية: يمكن تحديد الشروط البدائية غير المعدومة كالسرعة البدائية، الحرارة...... الخ.
- الشروط المحيطية: يمكن فرض الشروط المحيطية ذات القيمة المعدومة.

- القيود (CONSTRAINTS)
- شروط الاتصال (CONTACT)
- التحكّم بالمخرجات.



شكل (7−12) يوضح أقسام ملف الإدخال [4].

- HISTORY DATA:

في هذه المجموعة يتم تقسيم الحل إلى خطوات، تبدأ كل خطوة بالخيار STEP* وتنتهي بالخيار END STEP*، وأهم المعلومات التي تدخل ضمن هذه المجموعة هي:

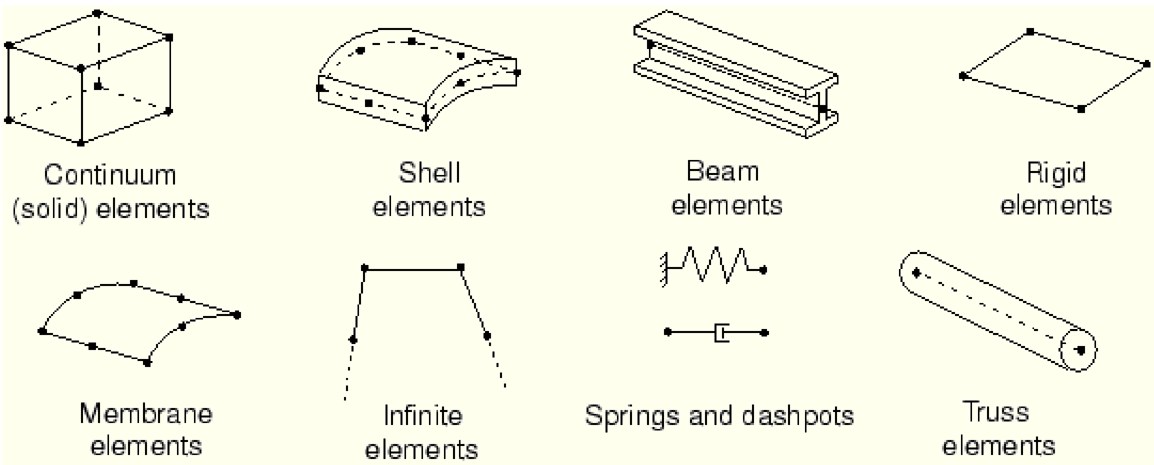
- نوع التحليل: وهو يستخدم لتحديد نوع خطوات التحليل التي سيقوم بها البرنامج، وهذه المعلومة يجب أن توضع مباشرة بعد خيار STEP*
- التحميل: تحديد نوعية الحمولة إن كانت مركّزة، موزّعة أو حرارية.... الخ. وعادةً يكون الخيار STEP* هو نقطة الفصل بين مجموعتي المعلومات (HISTORY DATA) و (MODEL DATA) حيث كل ما سيظهر قبل هذا الخيار هو MODEL DATA وكل ما يظهر بعده يعتبر HISTORY DATA.

7−3−1−2 مكتبة العناصر

هناك تشكيلة واسعة من العناصر المتوفّرة في ABAQUS تزوّد هذه المكتبة الشاملة المستخدم بمجموعة أدوات قوية للعناصر من أجل العديد من المسائل المختلفة.

يتميز كل عنصر في ABAQUS بكل مما يلي: العائلة(FAMILY)، درجة الحرية، عدد العقد، توابع الشكل، بحسب العنصر أحادي أو ثنائي أو ثلاثي البعد ..... الخ.

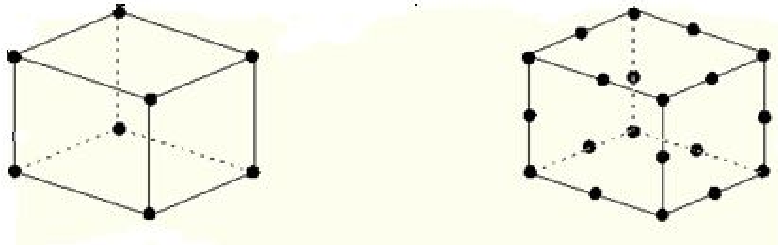
تشير العائلة إلى العنصر في نوع محدّد من التحليل مثل العنصر المستمر (SOLID)، الجائز(BEAM)، القشري (SHELL)، النابضي (SPRING)........الخ. شكل (7-13).



شكل (7-13)أشكال أكثر العناصر استخداماً [4].

أمّا درجات الحرية فهي متغيّرات محسوبة في التحليل. فيمكن أن تكون الانتقالات أوالدورانات في الاتجاهات 1,2,3 من أجل التحليل الإنشائي، أو درجة الحرارة من أجل تحليل النقل الحراري. بالنسبة لعدد عقد العنصر فتحدّد بحسب توابع الشكل (INTERPOLATION)وتحسب متغيّرات التحليل عند عقد العنصر بينما في النقط الأخرى من العنصر تكون المتغيّرات وسطية.

يبين الشكل (7-14) أنواع العناصر حيث العناصر التي تملك عقد عند الزوايا فقط تدعى بالعناصر من الدرجة الأولى أو الخطية، حيث يكون شكل التزايد خطي. بينما تلك التي تملك عقد وسطية بالإضافة إلى تلك عند الزوايا تستخدم شكل تزايد من المرتبة الثانية فتسمّى هذه العناصر بالعناصر من المرتبة الثانية أو التربيعية.



شكل (7−14) العناصر الخطية والتربيعية [4].

ينصح البرنامج باعتماد أحد العنصريين التاليين في حالة الانعطاف:

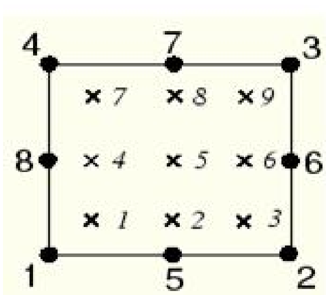
- العنصر التربيعي CPS8.
- العنصر الخطي CPS4R.

وسنبين فيما يلي دلالة كل حرف من الأحرف المعتمدة في اسم العنصر:

C هو اختصار لـ (continuum element) يدل على أن العنصر ينتمي إلى عائلة العناصر المستمرة (الصلبة) وهي مناسبة من أجل نمذجة جوائز بيتونية مستطيلة المقطع.

PS وهي اختصار لـ (plan stress) تدل على أن العنصر ثنائي البعد بحيث يعرف ضمن المستوي X-Y وتكون القوى والانتقالات محصورة في هذا المستوي، بحيث يملك هذا العنصر درجتي حرية هما الانتقال بالاتجاه X و الانتقال بالاتجاه Y .

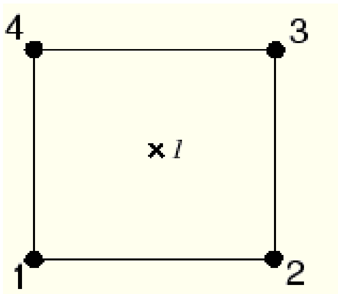
إن العدد 8 في العنصر CPS8 يدل على عدد العقد المعتمدة كما هو موضح بالشكل (7−15) وبما أن هناك ثلاثة نقاط تكاملية – نقاط غوص – في كل اتجاه فإن نوع التكامل تام (full integration)



الشكل (7−15) العنصر التربيعي CPS8 [4].

إن العدد 4 في العنصر CPS4R يدل على عدد العقد المعتمدة كما هو موضح بالشكل (7−16)

R في العنصر CPS4R تدل على أنه تم تقليل عدد النقاط التكاملية على مساحة العنصر أي أنه من نوع (Reduced-integration).



الشكل (7−16) العنصر الخطي CPS4R [4].

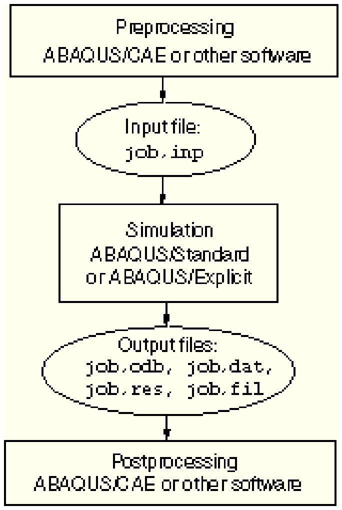
7−3−1−3 مراحل التحليل

هي مقسّمة بشكل رئيسي لثلاث كتل مختلفة:

مرحلة ما قبل التحليل والمعالجة THE PRE-PROCESSOR

مرحلة المحاكاة (THE SIMULATION)

مرحلة ما بعد التحليل والمعالجة (THE POST-PROCESSOR)



الشكل(7−18) مراحل التحليل [4].

7-3-1-3-1 مرحلة ما قبل التحليل PRE-PROCESSOR

في الكتلة الأولى المسمّاة PRE-PROCESSOR يتم بناء النموذج وإنشاء ملف الإدخال (input file) من خلال محرر النصوص وذلك من أجل النماذج البسيطة كحالتنا ، أما في حال كانت المسألة معقدة كأن تحوي عدة أجزاء بحاجة إلى تجميع، فيتم اعتماد الواجهة الرسومية للبرنامج ABAQUS/CAE .

يتم في هذه المرحلة الأمور التالية:

أ- توليد النموذج Model Generation

لتقديم كل المعلومات التي نحتاجها لحساب مصفوفة الصلابة يجب تعريف الخواص المختلفة كنوع العنصر وأبعاد الشبكة ومن خلال معلومات الربط (Connectivity) يقوم البرنامج بتجميع مصفوفة الصلابة العنصرية وشعاع القوى المكافئة للحصول على معادلات التوازن العامة.

تم تحديد أبعاد العنصر (Geometry) عن طريق إدخال توضّع كل العقد ومن ثم ربط هذه العقد بعناصر من خلال العبارتين البرمجيتين التاليتين:

```
*Node
*Element, type=CPS8
```

حيث في الأسطر التي تلي العبارة البرمجية الأولى Node* نحدد إحداثيات كل عقدة من عقد الشبكة وذلك حسب جملة الإحداثيات المختارة، ومن خلال العبارة البرمجية الثانية نحدد نوع العنصر المستخدم، وهنا على سبيل المثال تم اختيار العنصر CPS8، ومن ثم في الأسطر التالية نحدد العقد التي تشكل كل عنصر من عناصر الشبكة.

ب- تعريف المادة Material Definition

يجب ربط العنصر بمادة معيّنة . فاعتماداً على التحليل يمكن أن تكون الخواص المادية خطية(تحليل مرن خطي) أو لا خطية (كمكانيك الانكسار)، متماثلة المناحي (Isotropic)، أو قائمة المناحي (Orthotropic) ثابتة أو متعلّقة بالحرارة.

قد يتكوّن النموذج من مادة واحدة أو أكثر، حيث يتم تعريف المواد وإدخال مجموعات مختلفة من خواص المواد من خلال العبارة البرمجية التالية:

```
*Material, name=steel
```

فمثلاً من أجل الفولاذ يتم إدخال معامل يونغ ومعامل بواسون (خواص المرونة) وإجهاد الخضوع (خواص اللدونة)

ت- حالات التحميل Load States

تتضمّن حالات التحميل الشروط الطرفية وتوابع القوى المطبّقة خارجياً . تعرف حالات التحميل في التحليل الإنشائي عنطريق القوى المركّزة (Concentrainted)، والعزوم،.....الخ. ويمكن توزيع القوى على العناصر : كالحمولات السطحية وهيقوى موزّعة مطبّقة على السطح مثل الانضغاط (Pressure) ، الحمولات الجسمية التي هيقوى حجميه كتمدّد المادة عند تزايد الحرارة في التحليل الإنشائي، قوى العطالة Iinternal Forces)التي تصف قوى عطالة الجسم كتسارع الجاذبية الأرضية (Gravity)، السرعة الزاوية والتسارع ، أو الحمولات الحقلية الأخرى كالتشوهات الحرارية.

إن حالة التحميل في أمثلتنا هي حمولة مركزة في منتصف الجائز تم تعريفها من خلال العبارة البرمجية التالية:

*CLOAD

حيث ندخل رقم العقدة التي تتركز فيها الحمولة واتجاهها بالنسبة للمحاور المحلية وكذلك قيمة هذه الحمولة.

ث- الشروط الطرفية Boundary Condition

تعرف الشروط الطرفية بقيم درجات الحرية (DOF) على الأطراف في التحليل الإنشائي تكون درجات الحرية هي الانتقالات و الدورانات. ويمكن اعتبار النموذج متناظر أو غير متناظر حسب الشروط التالية:

- **شروط التناظر Symmetry Condition**

تطبّق شروط التناظر لتخفيض حجم مصفوفة الصلابة للنموذج ، حيث تكون نمذجة جزء فقط من النموذج كافية عادةً وذلك بدون الإخلال بدقة الحل. وهناك أربعة نماذج للتناظر يجب أن تتحقّق في آن واحد: تناظر الشكل الهندسي، الشروط الطرفية، المادة والحمولات. تحت هذه الشروط سيكون الحل متناظراً .

في أمثلتنا هناك تناظر بالنسبة للمستوي Y-Z وبالتالي فإن الانتقال على طول المحور X للعقد الواقعة على مستوي التناظر معدوم $U_X = 0$.

يتم تعريف الشروط الطرفية من خلال إدخال اسم مجموعة العقد المقيدة ودرجات الحرية التي تم تقييدها عبر العبارة البرمجية التالية:

*Boundary

- **شروط التناظر العكسي Anti-Symmetry Condition**

يظهر عدم التناظر في النموذج في حال الإخلال بأحد الشروط الأربعة السابقة. حيث يعتبر النموذج متناظراً عكسياً عندما تكون الحمولات متناظرة عكسياً حتى لو كانت الشروط الطرفية والمادة والأبعاد كلها متناظرة.

7-3-1-3-2 مرحلة المحاكاة SIMULATION

في هذه المرحلة يحل برنامج الحل مجموعة من المعادلات من خلال طريقة العناصر المحدودة. نحصل على الحل الأولي عن طريق إيجاد قيم درجات الحرية العقدية والتي هي الانتقالات والدورانات في التحليل الإنشائي. بعد ذلك يتم استنتاج النتائج والتي هي حساب الإجهادات والتشوهات.عادةً يحسب البرنامج هذه القيم عند النقاط التكاملية.
هناك عدة طرق لحل تلك المعادلات حسب نوعية التحليل إن كان خطي أو لا خطي، ستاتيكي أو ديناميكي..... يحل برنامج ABAQUS كل المعادلات المطلوبة بآن واحد.
تستخدم طريقة الحل المباشر بشكل أساسي في التحليل الخطي لأنها فعّالة نوعاً ما في طريقة العناصر المحدودة.لكن عندما تكون المعادلات لا خطية يجب حلّها بشكل تكراري وهذا ما يزيد الزمن الذي يستهلكه الحاسوب بشكل ملحوظ.

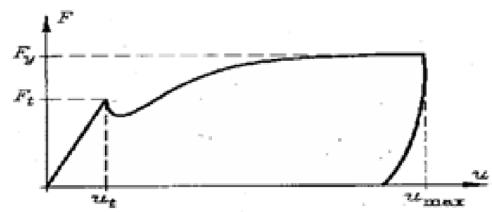
7-3-1-3-3 مرحلة ما بعد التحليل POST-PROCESSOR

في هذه المرحلة يستخدم POST- PROCESSOR لرؤية وتدقيق نتائج الحل الناتجة من جراء حل جملة من المعادلات ، وعادةً ما تكون كمية كبيرة جداً من المعلومات الرقمية ، لذلك يجب عرض هذه النتيجة بطريقة واضحة وبسيطة، حيث يتم عرض النتائج بشكل صور ومخططات ويستطيع المستخدم القيام بعمليات تقريب وتحريك وتدوير لهذه العناصر أمّا حقول المتغيّرات فيمكن رسمها على العناصر وذلك بشكل خطوط كونتور وا إطارات خطيّة أو تشوهات. هناك إمكانية لإجراء عرض متحرّك لتمثيل الحركة الديناميكية للمسألة. ويمكن أيضاً الحصول على جداول المخرجات والملفات النصية والمخططات، حيث يكون بالإمكان تغيير خيارات عرض النتائج التي تتضمّن مخططات الألوان والحركات ومخططات الشكل المشوّه وغير المشوّه ومخططات X-Y.
وعادةً يحوي الـ POST-PROCESSOR عادةً تحليلات أخرى إضافية مستنتجة كحالة تراكب التحميل، تقدير الخطأ،........الخ.

7-3-1-4 التحليل اللا خطي Non-Linear Analysis

يقسم منحني قوة – انتقال للجوائز التي سيتم نمذجتها إلى قسمين شكل (7–19):

- القسم الأول تكون فيه الاستجابة خطية تعتمد على معامل مرونة المادة وذلك قبل تشقق البيتون يعطى حل المعادلة الخطية في ABAQUS بشكل مباشر باستخدام طريقة غوص.
- والقسم الثاني تصبح الاستجابة لا خطية بعد تشقق البيتون وبدء خضوع الفولاذ، وبالتالي التحليل الإنشائي لا خطياً ، ويوجد البرنامج الحل باعتماد طريقة نيوتن– رافسون التي سيتم شرحها لاحقاً .



الشكل (7–19) منحني استجابة الجائز [6].

إن مسألة التحليل الإنشائي اللا خطي هي واحدة من المسائلالتي تتغيّر فيها صلابة المنشأ عندما تتشوّه. يتم في هذا التحليل تجميع مصفوفة الصلابة للنموذج، وتوجد عدة فترات زمنية في التحليل مما يجعله يستغرق زمن أكبر من التحليل الخطي. وبما أن استجابة النظام اللا خطي هي ليست تابعاً خطياً لمقدار الحمولة المطبّقة، لذلك لا يمكن تطبيق مبدأ تجميع الآثار للحصول على الحليجب أن تعرّف كل حالة تحميل كتحليل منفصل.

سيتم فيما يلي شرح طريقة نيوتن –رافسون التي تستخدم للحصول على حلول المسائل اللا خطية وكذلك نوع التحليل المستخدم في النمذجة، ولكن قبل ذلك سنبين ما هي مصادر اللا خطية في محاكاة الميكانيك الإنشائي.

7–3–1–4–1 مصادر اللا خطية في محاكاة الميكانيك الإنشائي

a) اللا خطية المادية Material Non-Linearity

تملك أكثر المعادن علاقة إجهاد–تشوه خطية عند قيم صغيرة للتشوه، لكن في التشوهات الأعلى تصل المادة للخضوع، وعند تلك النقطة تصبح الاستجابة لاخطية وغير قابلة للرجوع.

b) اللا خطية الطرفية Boundary Non-Linearity

تحدث هذه اللاخطية إذا كانت الشروط الطرفية تتغيّر خلال التحليل. ويشاهد هذا النوع من اللا خطية عند حدوث انقطاعات كبيرة، وعندما يجري الاتصال (Contact) ما بين عنصرين أثناء المحاكاة، حيث يحدث تغيّر كبير وآني في استجابة النموذج.

c) اللا خطية الهندسية Geometric Non-Linearity

تحدث اللا خطية الهندسية عندما يؤثّر مقدار الانتقالات على استجابة النموذج، وتظهر بسبب زيادة الميل والدوران ونتيجة حمولات التقسية (Hardening) أو الإجهادات البدائية. وبحال كان الميل صغير (الانعطاف Deflection) يمكن اعتبار التحليل خطياً في البداية ولكن عند تزايد الانحناءات فإن شكل العنصر يتغيّر وبالتالي تتغيّر صلابة النموذج ، بالإضافة إلى أن الحمولات لا تبقى عمودية على العنصر، ويكون تأثير الحمولة ملحوظ على تغييرات النموذج. يساهم كل من هذين التأثيرين في الاستجابة اللا خطية للنموذج.

إن إضافة تأثيرات اللاخطية الهندسية في التحليل يتطلّب إجراء بعض التغييرات في ملف الإدخال، حيث يدخل المستخدم بارا متر NLGEOM إلى الخيار STEP*.

7-3-1-4-2 طريقة نيوتن-رافسون.

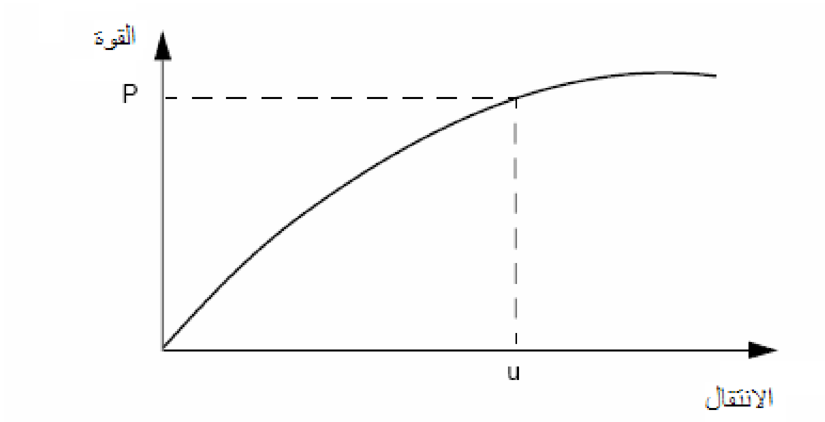
يوضّح الشكل (7-20) منحني الانتقال-الحمولة اللا خطي للنموذج، حيث يطبّق برنامج ABAQUS طريقة نيوتن-رافسون للحصول على حل المسائل اللا خطية.

في التحليل اللا خطي لا يتم الحل باستخدام نظام وحيد للمعادلات كما في المسألة الخطية، وإنّما بدلاً من ذلك يجري الحل بتطبيق الحمولات المحدّدة بشكل تدريجي ثم العمل بشكل متزايد حتى الوصول للحل النهائي المتقارب. لذلك يقسم ABAQUS المحاكاة إلى عدد من المراحل في زيادة التحميل والقيام بترتيب التوازن التقريبي عند نهاية كل تزايد حمولة.

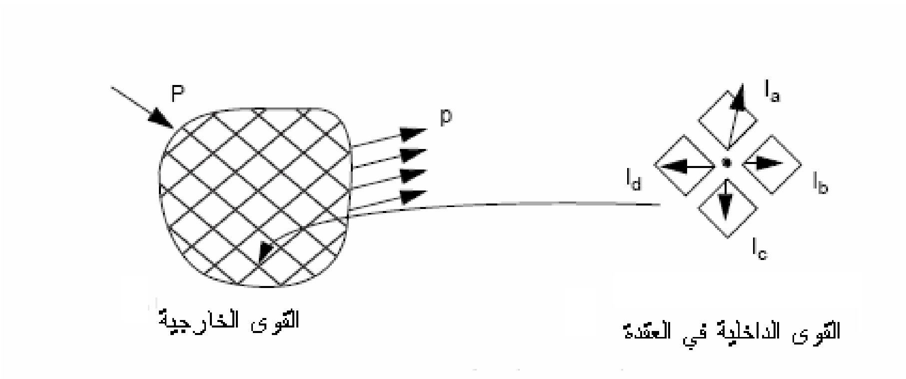
يأخذ ABAQUS عادةً عدد من التكرارات لتحديد الحل المقبول من تزايد التحميل . ويكون مجموع كل الاستجابات لمراحل التزايد هو الحل التقريبي للتحليل اللا خطي.

تقسم القوى المؤثرة على الجسم إلى قوى خارجية P وقوى داخلية (العقدية) I كما في الشكل (7-20)، تنتج عن القوى الداخلية إجهادات في العناصر التي تشكّل هذه العقدة، وحتى يكون الجسم في حالة توازن يجب أن يكون مجموع القوى في العقدة مساوياً للصفر، وحسب الحالة الأساسية للتوازن بأن القوى الداخلية والخارجية يجب أن يوازن أحدها الآخر نحصل على المعادلة التالية:

$$P-I=0$$



الشكل(7−20) منحني الحمولة−الانتقال اللا خطي [4].



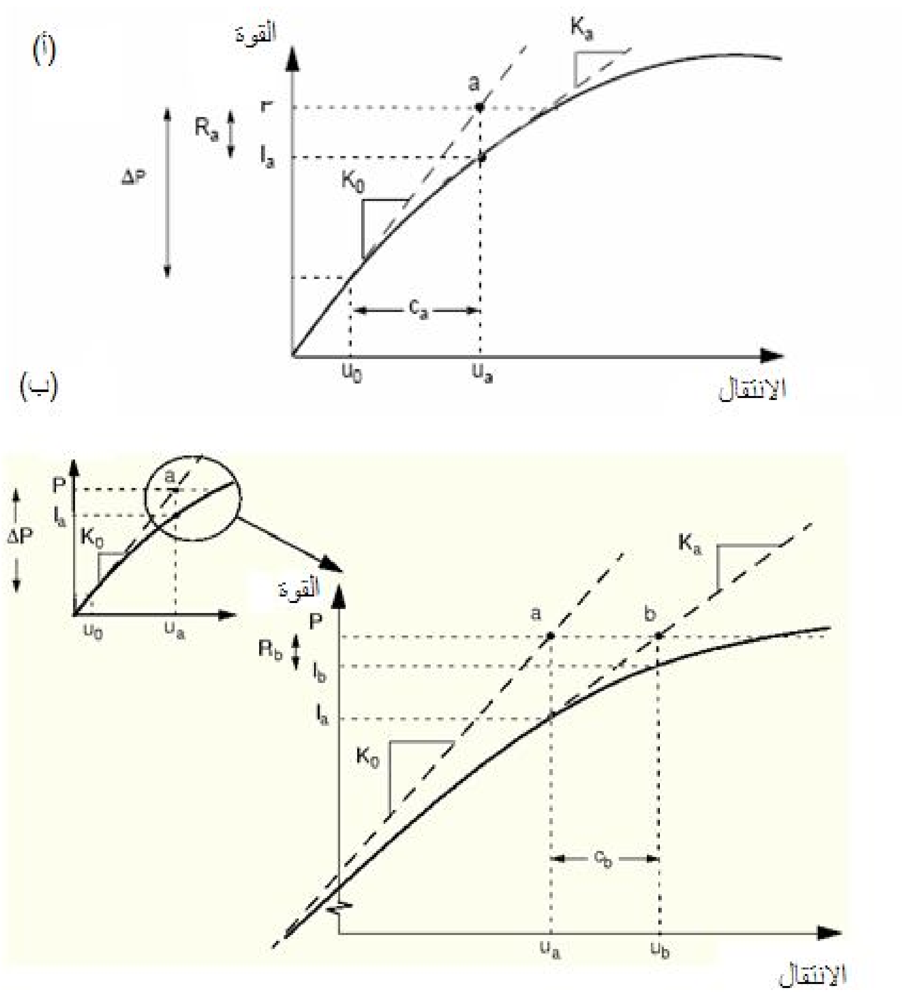
الشكل (7−21) القوى الداخلية والخارجية المؤثّرة على الجسم [4].

من الضروري أن يفهم المستخدم الاختلاف ما بين خطوة التحليل، تزايد الحمولة والتكرار. إن من التحميل يقلِلي خطوة أو عدة خطوات، يعر ّف المستخدم الخطوات التي تتضم ّنعادة ً إجراء التحليل والتحميل، يمكن تحديد الشروط الطرفية المختلفة وخيارات إجراء التحليل في كل خطوة، ويكون التزايد جزء من الخطوة. في التحليلات اللاخطية تكون الحمولة الكلية مطب ّقة على خطوات، إذ تقسم الحمولة إلى تزايدات صغيرة لإجراء طريقة الحل اللا خطي.

يقترح المستخدم حجم التزايد الأولي ويختار البرنامج بشكل أوتوماتيكي حجم التزايدات اللاحقة، ويكون النموذج متوازناً في نهاية كل تزايد تقريباً. إذا لم يكن النموذج متوازناً عند نهاية التكرار الأول يحاول البرنامج إجراء تكرار آخر. مع كل تكرار يحصل ABAQUS على حل يجب

أن يكون أقرب للتوازن، قد يحتاج البرنامج أحياناً إلى إجراء العديد من التكرارات للحصول على حل متوازن. وعند الوصول لهذا الحل المتوازن نكون عندئذٍ قد وصلنا للحل المطلوب.

يوضّح الشكل (7-22-أ) الاستجابة اللا خطية للنموذج تحت تزايد صغير للحمولة ΔP. يستخدم ABAQUS صلابة بدائية للنموذج ΔK_0، ونحسب تصحيح الانتقال C_a للنموذج بالاعتماد على الانتقال البدائي U_0 وتزايد القوة ΔP. وباستخدام C_a يمكن أن نحصل الانتقال U_a الجديد .



الشكل(7-22) (أ) التكرار الأول في التزايد، (ب) التكرار الثاني في التزايد [4].

يشكّل ABAQUS صلابة جديدة K_a للنموذج اعتماداً على إحداثياته الجديدة U_a، يحسب البرنامج أيضاً القوى الداخلية للمنشأ I_a بإحداثياته الجديدة، ثم يحسب الفرق ما بين الحمولة المطبّقة الكلية P و I_a بالشكل التالي:

$$R_a = P - I_a$$

حيث R_a هي القوى المتبقية من التكرار.
إذا كانت R_a الناتجة معدومة اعتمادا على منحني الانتقال مع الحمولة السابق سيكون النموذج في حالة توازن.

في المسائل اللاخطية من المستحيل تقريباً أن تكون قيمة R_a مساوية للصفر، لذلك يقار ب ABAQUS القيمة المحسوبة من التسامح الأولي. إذا كانت قيمة R_a أصغر من هذا التسامح المتبقي للقوة عندئذٍ يوافق البرنامج على الإحداثيات الجديدة للنموذج كحل متوازن. إن هذه القيمة للتسامح تكون حوالي 0.5% من القوة الوسطية في المنشأ. تحسب هذه القوة الوسطية أوتوماتيكياً بحسب الزمان والمكان خلال التحليل. إذا كانت R_a أصغر من قيمة التسامح الحالي، تكون R_a و P في حالة توازن ويكون تشكيل التوازن صحيح للنموذج تحت الحمولة المطبّقة. هناك شرط آخر يضعه البرنامج كقيد على تصحيح الانتقال C_a، والذي هو صغير نسبياً بالنسبة لتزايد الانتقال $\Delta U = U_a - U_0$ ويجب تحقيق كلاً الشرطين للتقارب قبل القول بأن الحل متقارب من أجل تزايد الحمولة.

إذا كان الحل الذي تمّ الحصول عليه من التكرار الأول غير متقارب عندئذٍ يقوم البرنامج بإجراء تكرار آخر للوصول إلى حالة التوازن بين القوى الخارجية والداخلية، يُستخدم في هذا التكرار الصلابة K_a المحسوبة عند نهاية التكرار السابق مع R_a لتحديد تصحيح الانتقال الآخر C_b الذي يضع النموذج في حالة توازن (النقطة b في الشكل (7–22–ب). يحسب البرنامج القوة المتبقية الجديدة R_b وذلك باستخدام القوى الداخلية من الترتيب الجديد للنموذج U_b ويقارنها مع قيمة التسامح كما يقارن أيضاً تصحيح الانتقال من التكرار الثاني C_b مع تزايد الانتقال $\Delta U_b = U_b - U_0$ وإذا لم يتقارب الحل يجري البرنامج تكرار آخر وهكذا...

في كل تكرار يتم تجميع مصفوفة الصلابة للنموذج في التحليل اللاخطي كما يتم حل مجموعة المعادلات الناتجة، إن كل تكرار يكافئ إجراء حل خطي كامل . لتبسيط الحل الأمثل للمسائل اللا خطية يعدّل ABAQUS حجم تزايدات التحميل بشكل أوتوماتيكي، يقترح المستخدم حجم التزايد الأولي فقط وتبعاً لدرجة اللاخطية في النظام يتغيّر عدد التكرارات المجراة للوصول إلى حل متقارب. و إذا لم يتقارب الحل بعد 16 تكرار يكون الحل متباعد، لذلك يترك ABAQUS

التزايد ويبدأ بتزايد آخر مع حجم تزايد مساو لمجموع 5% من القيمة السابقة.ثم يحاول ABAQUS إيجاد الحل بتزايد أصغر للحل، يمكن أن يضيف المستخدم أيضاً بارا متر INC لتحديد العدد الأعظمي للتزايدات المسموحة خلال الخطو ة. ينهي البرنامج الحل إذا احتاج إلى تزايدات أكثر من هذا الحد لإكمال الخطوة. العدد الافتراضي للخطوات هو 100، لكن إذا كانت اللاخطية ذات أهمية كبيرة في التحليل عندئذٍ قد يتطلّب ذلك إجراء عدد أكبر من التزايدات.

```
*STATIC
0.1,1.0
```

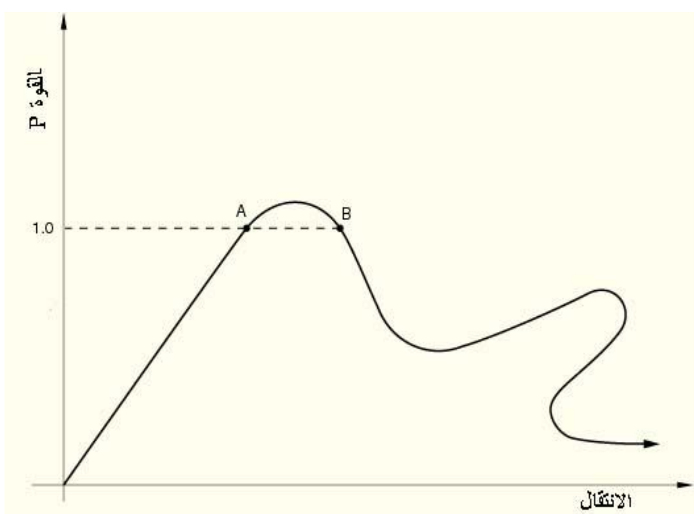
حيث 0.1 هو $\Delta T_{initial}$، و 1.0 هو T_{total}.

ويكون تزايد الحمولة البدائي هو:

$$\frac{\Delta T_{initial}}{T_{total}} * LoadMagnitude$$

7-3-1-4-3 تحليل الانهيار الغير مستقر

في بعض مسائل الاخطية – كما هو الحال في أمثلتنا – يحدث الانهيار وتظهر الاستجابة المتعلقة بـ قوة – انتقال قساوة سالبة ولذلك فإن العنصر الإنشائي يجب أن يحرر طاقة حتى يحافظ على التوازن. هناك عدة طرق لنمذجة هذا السلوك منها طريق ريكس المعدلة (modified Riks) التي تعطي الحلول حتى في حالات معقدة كالحالة التي يبينها الشكل (7–23).



الشكل (7–23) منحني لاستجابة غير مستقرة [4].

إن طريقة ريكس تعتمد طريقة نيوتن – رافسون في إيجاد الحل مع فروق بسيطة وهي أن القـوة تعتبـر مقـدار مجهـول لـذلك يجـب أن يعتمـد شـيء آخـر حتـى يـتم التقـدم بالحـل؛ إن ABAQUS/STANDARD يستخدم طول القوس l (arc length) لإيجاد التوازن وتؤخذ القوة كمقدار نسبي (porportional loading) باعتماد العامل λ الذي تعطى قيمته كأحد المخرجات من أجل كل تزايد أثناء الحل. وعند تعريف هذا النوع من التحليل للخطوة، يقوم المستخدم بتحديد طول القوس البدائي Δl_{in} وبالتالي يحسب عامل القوة النسبية البدائي $\Delta\lambda_{in}$ من العلاقة التالية:

$$\Delta\lambda_{in} = \frac{\Delta l_{in}}{l_{period}}$$

l_{period}: طول القوس الكلي يحدد من قبل المستخدم ويؤخذ مساوياً لـ 1

تستخدم قيمة $\Delta\lambda_{in}$ خلال التكرار الأول من الخطوة، في حين أن λ للتكرارات والتزايدات اللاحقة تُحسب أوتوماتيكياً ، أي أن λ هي جزء من الحل، ولكن يتم التحكم بالتزايد الأوتوماتيكي من خلال إدخال قيمة $\Delta l_{\max}$ طول القوس الأعظمي و $\Delta l_{\min}$ طول القوس الأصغري.

يمكن في هذا النوع من التحليل وضع شروط إنهاء، من خلال تحديد القيمة العظمى لعامل نسبية القوة λ_{end} أومن خلال إعطاء قيمة الانتقال الأعظمي عند درجة الحرية المحددة في الخطوة، وعند الوصول إلى إحدى هاتين القيمتين يتوقف التحليل ، وفي حال عدم الوصول إلى أي من هاتين القيمتين يستمر التحليل بحسب عدد التزايدات المحددة أثناء تعريف الخطوة.

تم تعريف نوع خطوة التحليل في أمثلتنا من خلال العبارتين البرمجيتين التاليتين:

```
*STEP,INC=100
*STATIC,RIKS
```

7-3-1-5 نموذج concrete smeared cracking

يتيح برنامج ABAQUS/STANDARD عدة طرق لنمذجة البيتون وتم اختيار نموذج Concrete Smeared Cracking لتعريف البيتون حيث هذا النموذج:

- يؤمن القدرة على نمذجة جميع العناصر البيتونية بما في ذلك الجوائز، الشبكيات، القشريات، والكتل الصلبة.
- يستخدم في حال كان العنصر بيتون فقط.
- يمكن أن يُستخدم مع قضبان التسليح من أجل نمذجة البيتون المسلح.
- تم تصميمه من أجل الحالات التي يكون فيها البيتون خاضع لإجهادات ضغط منخفضة.
- يصف استجابة المادة بعد حصول التشقق وبدء الانهيار .

وسيتم فيما يلي شرح الأمور المتعلقة بهذا النموذج:

7-3-1-5-1 التسليح

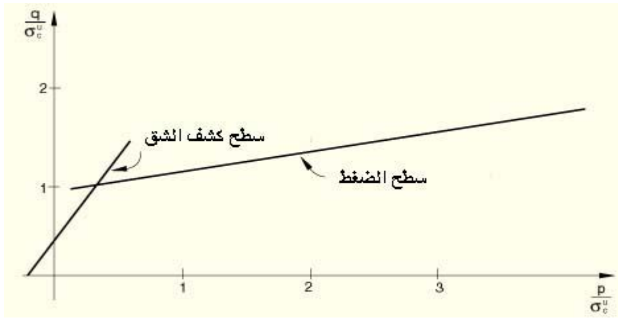
يتم تزويد المقطع بالتسليح من خلال قضبان التسليح التي قد تعرف بشكل منفرد أو من خلال وضعها في السطح الموجه، إن القضبان عبارة عن عناصر تتشوه باتجاه واحد ونعتمد نماذج المعادن اللدنة لوصف سلوكها.

يعتبر سلوك البيتون في هذا النموذج مستقلاً عن القضبان، حيث يتم إدخال التأثير المتبادل بين القضبان والبيتون كالتماسك والانزلاق من خلال إعطاء قساوة الشد (tension stiffening) للبيتون، حيث يتم من خلالها محاكاة انتقال القوة عبر الشق عن طريق القضبان.

7-3-1-1-5-2 التشقق وكشف الشق

يعتبر التشقق من أهم ما يحدد السلوك، ويتم الافتراض بأن التشقق يحصل عندما تصل الإجهادات الشادة في المادة إلى سطح الانهيار والذي يسمى سطح كشف الشق (crack detection surface). إن سطح كشف الشق هو علاقة خطية بين إجهادات الضغط المكافئة P و إجهادات ميزس المائلة المكافئة q شكل (7-24).

عندما يتم الكشف عن الشق يتم تخزين اتجاهه من أجل الحسابات اللاحقة ويبقى لنهاية الحسابات مع إمكانية انفتاحه وانغلاقه.تُجرى الحسابات بشكل مستقل عند كل نقطة من النقاط التكاملية لنموذج العناصر المحدودة، و تدخل التشققات في هذه الحسابات من خلال تأثيرها على الإجهادات وقساوة المادة عند النقطة التكاملية.



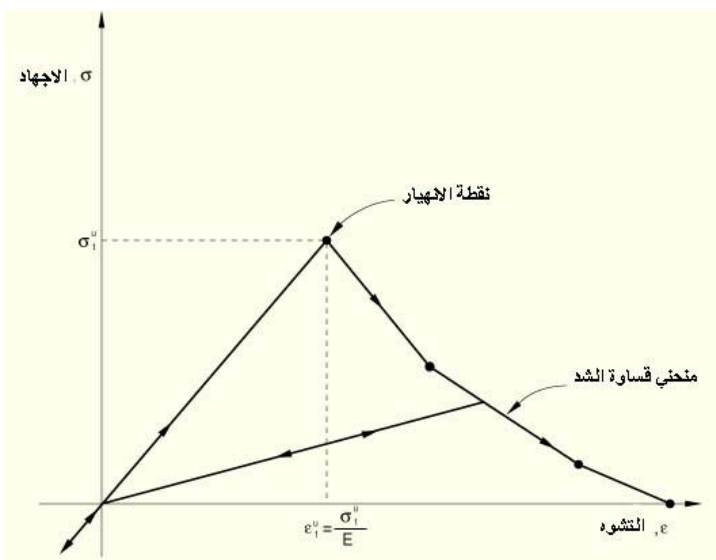
الشكل (7–24) سطح الانهيار في مستوي (p,q) [4].

7–3–1–5–3 قساوة الشد

يتم اعتماد قساوة الشد لنمذجة التشوهات المباشرة عبر الشق للبيتون، وكذلك محاكاة التأثير المتبادل بين البيتون والتسليح بطريقة بسيطة، ويتم تحديد قساوة الشد بإحدى الطريقتين التاليتين:

- علاقة إجهاد – تشوه بعد حصول التشقق

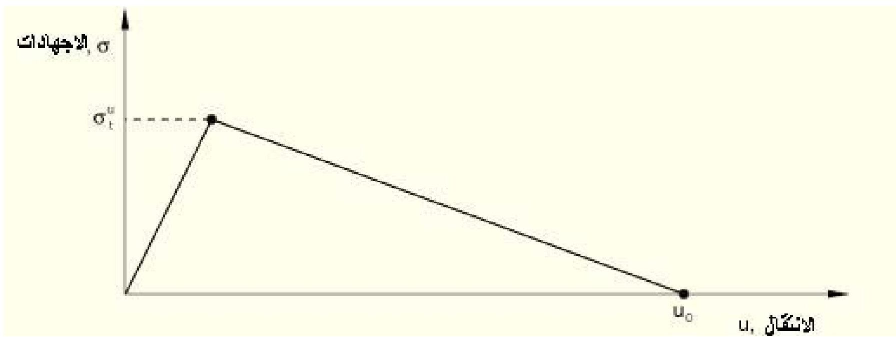
حيث يتم تحديد الإجهادات كتابع للتشو هات شكل (7–25)، وتعتمد قيمة قساوة الشد على كثافة التسليح، التماسك بين البيتون والقضبان، حجم الحصويات بالنسبة إلى أقطار القضبان و الشبكة المعتمدة في تقسيم النموذج .



الشكل (7–25) نموذج قساوة الشد [4].

• معيار طاقة الانكسار للشق

تستخدم هذه الطريقة عند عدم وجود تسليح أو عندما يكون التسليح قليل ، لأن اعتماد الطريقة الأولى قد يؤدي إلى نتائج خاطئة، تم اعتبار الطاقة اللازمة لفصل واحدة السطح من الشق كأحد بارامترات المادة والتي تستخدم في حالات الانكسار الهش. في هذه الطريقة يتم وصف السلوك الهش للبيتون من خلال علاقة إجهادات – انتقالات ويقصد بالانتقال هنا عرض الشق الشكل (7−26).



الشكل(7−26) نموذج طاقة انكسار الشق [4].

إن u_0 هو عرض الشق الحدي الذي تنعدم عنده الإجهادات ويحسب من العلاقة:

$$u_0 = \frac{2G_f}{\sigma_t^u}$$

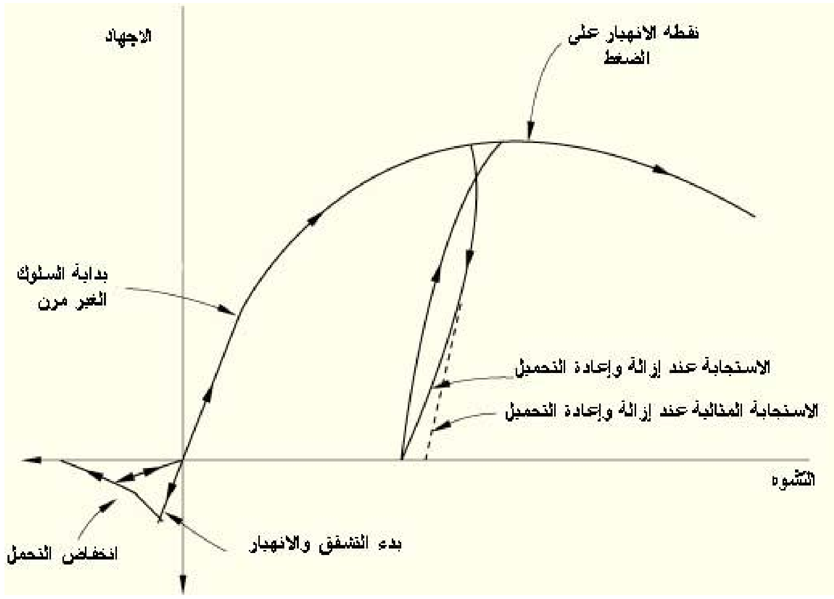
σ_t^u : أعظم إجهاد للشد يمكن للبيتون تحمله.

ويمكن اعتماد القيم التالية لعرض الشق الحدي:

- u_0=0.05 mm من أجل البيتون العادي.
- u_0=0.08 mm من أجل البيتون عالي المقاومة.

7−1−1−5−4 سلوك البيتون المعرض لقوى محورية

إن الشكل (7−27) يوضح استجابة البيتون عند تعرضه لقوى محورية كما يأخذها البرنامج، يتضح من الشكل بأن سلوك البيتون المضغوط في البداية مرن ً والعلاقة بين الإجهادات والتشوهات خطية، مع زيادة قيمة الإجهادات تبدأ التشوهات اللدنة بالظهور وتصبح العلاقة منحنية، تستمر الإجهادات بالزيادة حتى تصل إلى الإجهاد الحدي على الضغط، حيث تفقد المادة القدر ة على تحمل الإجهادات ويحصل الانهيار.



الشكل(7–27) سلوك البيتون مع القوى المحورية [4].

في حال تم إزالة الحمولة بعد ظهور التشوهات اللدنة فإن العلاقة لا تبقى خطية وا ٍنما تصبح منحنية وذلك بسبب فقدان المادة مرونتها نتيجة للتضرر الحاصل للمادة، يتم إهمال هذا الأمر في البرنامج وأخذ الحالة المثالية كما هو موضح في الشكل (7–27) أعلاه.

في حال تم تحميل العينة بحمولات شادة فإن سلوك البيتون يكون مرناً حتى تصبح قيمة الإجهادات الشادة مساوية إلى 10% - 7% من قيمة إجهاد الضغط الحدي فتتشكل الشقوق بسرعة كبيرة لدرجة يصعب معها إيجاد السلوك الفعلي. يفرض النموذج عدم وجود تشوهات دائمة أي أن الشقوق يمكن أن تغلق تماماً في حال أصبحت الإجهادات ضاغطة.

7-3-1-5-5 سلوك البيتون المعرض لقوة غير محورية

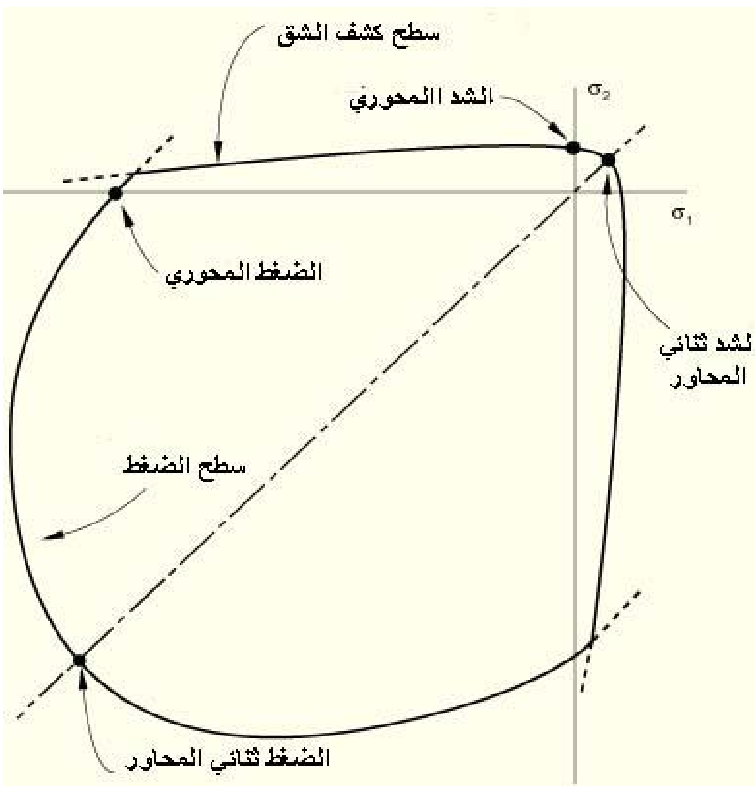
إن الشكل (7–28) يبين سطوح الانهيار والخضوع لبيتون خاضع لقوى غير محورية، إن هذه السطوح تلائم البيانات التجريبية ويمكن من خلالها الحصول على نسب الانهيار (failure ratios) وهي:

- نسبة إجهاد الضغط الحدي ثنائي المحاور إلى إجهاد الضغط الحدي المحوري و تؤخذ في حال عدم وجودها ضمن المعطيات 1.16.

- القيمة المطلقة لنسبة إجهاد الشد المحوري عند الانهيار إلى إجهاد الضغط الحدي المحوري وتؤخذ في حال عدم وجودها ضمن المعطيات 0.09.

- نسبة التشوه اللدن الموافق لإجهاد الضغط الحدي ثنائي المحاور إلى التشوه اللدن الموافق لإجهاد الضغط الحدي المحوري وتؤخذ عند عدم وجودها 1.28.

- نسبة إجهاد الشد الرئيسي عند التشقق في مستوي الإجهادات، عندما تكون إجهادات الضغط الرئيسية مساوية للقيمة الحدية، إلى إجهاد التشقق نتيجة الشد المحوري ويؤخذ مساوي لـ 1/3 .



الشكل (7-28) سطوح الانهيار والخضوع في مستوي الإجهادات [4].

7-3-2 النمذجة باستخدام برنامج ABAQUS

تم نمذجة الجوائز الموضحة في الجدول (7-2) بشكل مستوي ثنائي البعد باستخدام عناصر محدودة مستوية SOLID ELEMENT ويختلف كل نموذج عن آخر بأبعاد المقطع ونسبة التسليح المستخدمة ونحافة الجائز .ولأن الجوائز متناظرة تم نمذجة نصف الجائز فقط لكل حالة.

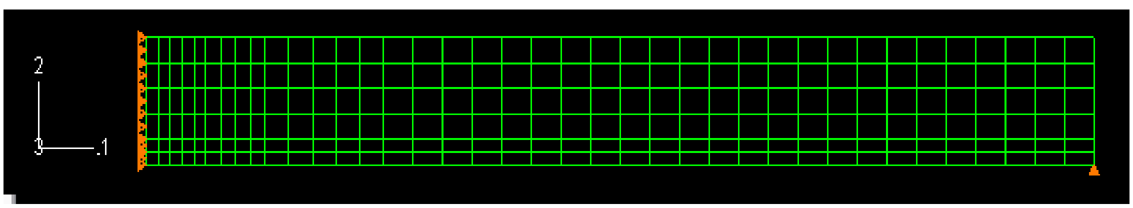
سيتم توصيف كيفية النمذجة باستخدام برنامج ABAQUS من أجل نصف الجائز C50-18 بحيث:

- الأبعاد

L=7.2 [m], h=0.4 [m], b=0.2 [m]

- التقسيم

تم اختيار التوزع الموضح بالشكل(7-29) للعقد، بحيث تم تكثيف العناصر عند تركز الإجهادات ونوع العنصر المعتمد هو CPS4R.



الشكل (7-29)تقسيم الجائز مع الشروط الطرفية.

- تعريف المواد
  - الفولاذ
- متماثلة المناحي (Isotropic).
- المواصفات المرنة Es=200000 [N/mm2].
- المواصفات اللدنة fy=500 [N/mm2] .
  - البيتون
- متماثلة المناحي (Isotropic).
- الكثافة $2400\ kg/m^3$.
- المواصفات المرنة Es=30000 [N/mm2], ν=0.2.
- تم اعتماد طريقة Concrete Smeared Cracking مع $f`_c=35\ [N/mm^2]$ تم إدخال (Tension Stiffening) (type= Displacement) نتيجة أن التسليح المستخدم قليل

حيث تم أخذ قيمة عرض الشق الذي تنعدم عنده قيمة الإجهادات الشادة المنقولة بين وجهي الشق مساوياً لـ $u_0=0.128$ [mm]، أيضاً تم إدخال قيم نسب الانهيار (Failure Ratios) حيث أُخذت قيمة نسبة تحمل البيتون على الشد إلى تحمله على الضغط مساوية لـ 0.11، وتم اعتماد القيم الافتراضية لنسب الانهيار الأخرى.

- الشروط الطرفية

تم تقييد العقدة الموافقة للمسند المتدحرج بالاتجاه 2.

تم تقييد العقد الموافقة لمنتصف الجائز بالاتجاه 1.

- التحميل

حمولة مطبقة في منتصف الجائز .

- نوع التحليل

تم اختيار Static Riks من أجل خطوات التحليل لأنها تمكننا من إيجاد الاستجابة الغير مستقرة للعناصر .

- تحديد المخرجات

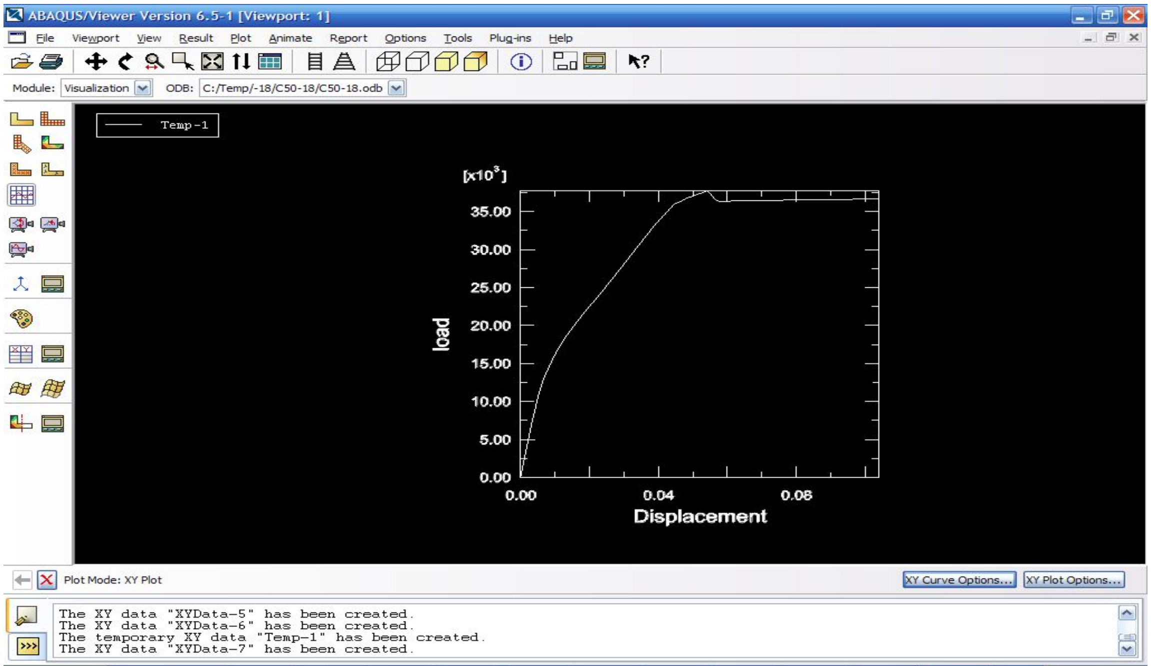
تم التركيز على المخرجات الخاصة بالقوة والانتقال في منتصف الجائز.

- إجراء التحليل

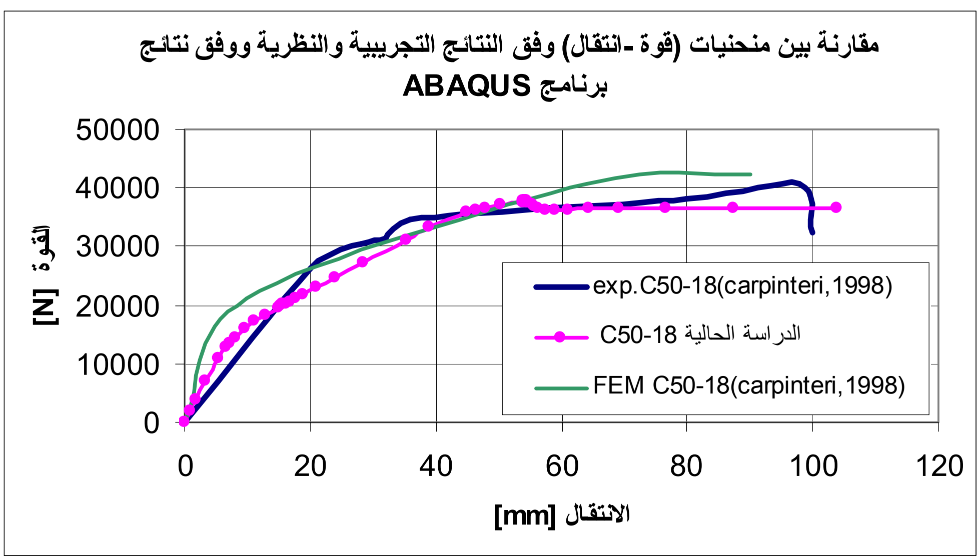
بعد إدخال كل المعطيات السابقة نعطي البرنامج الأمر ببدأ التحليل من خلال نافذة Command للحصول على النتائج.

يتم عرض النتائج المستخلصة من ABAQUS/STANDARD من خلال البرنامج الفرعي ABAQUS/VIEWER، يوضح الشكل (7−30) واجهة البرنامج التي تمكننا من إنشاء منحنيات X-Y للمخرجات التي حصلنا عليها مثل القوة والانتقال.

إن الشكل (7−31) يوضح منحنيات قوة انتقال الناتجة عن الدراسة التجريبية والنموذج النظري للمعد البحث [8] وكذلك المنحني الناتج عن هذه الدراسة باستخدام برنامج ABAQUS للحالة التي تم توصيفها. حيث نلاحظ من الشكل التقارب المقبول بين المنحنيات الثلاثة.



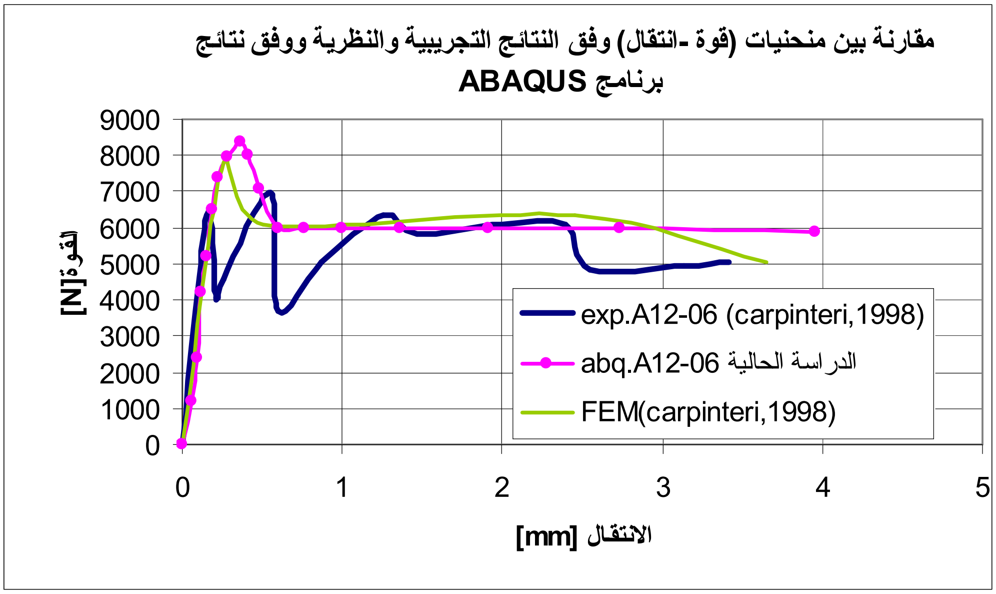
الشكل (7−30) واجهة ABAQUS/VIEWER التي تم استخدامها [4].



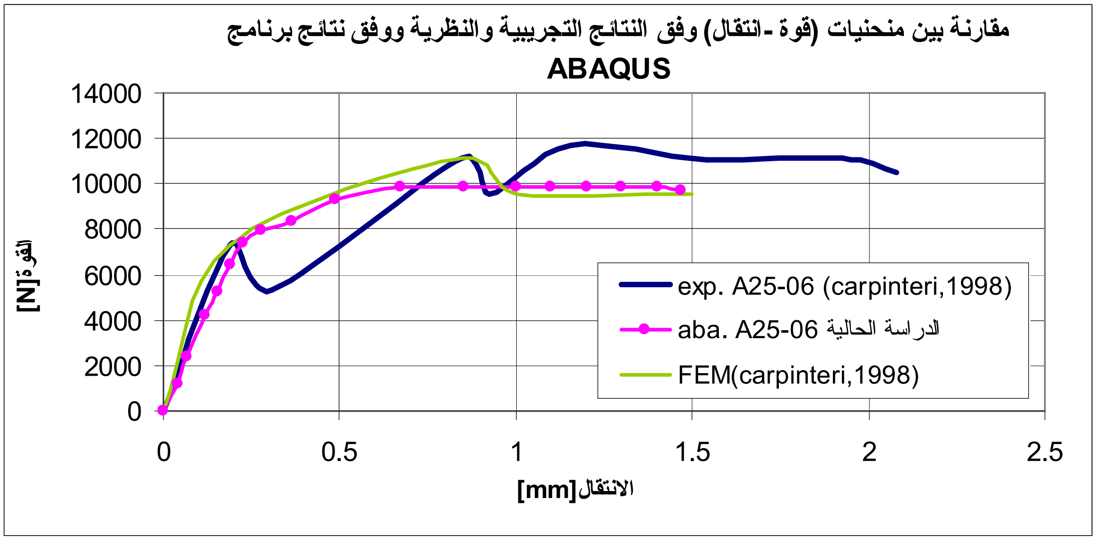
الشكل (7−31) منحنيات قوة− انتقال لمقطع C200×400 mm2 مع نحافة 18 ونسبة تسليح 0.50%.

7-3-3 نتائج النمذجة

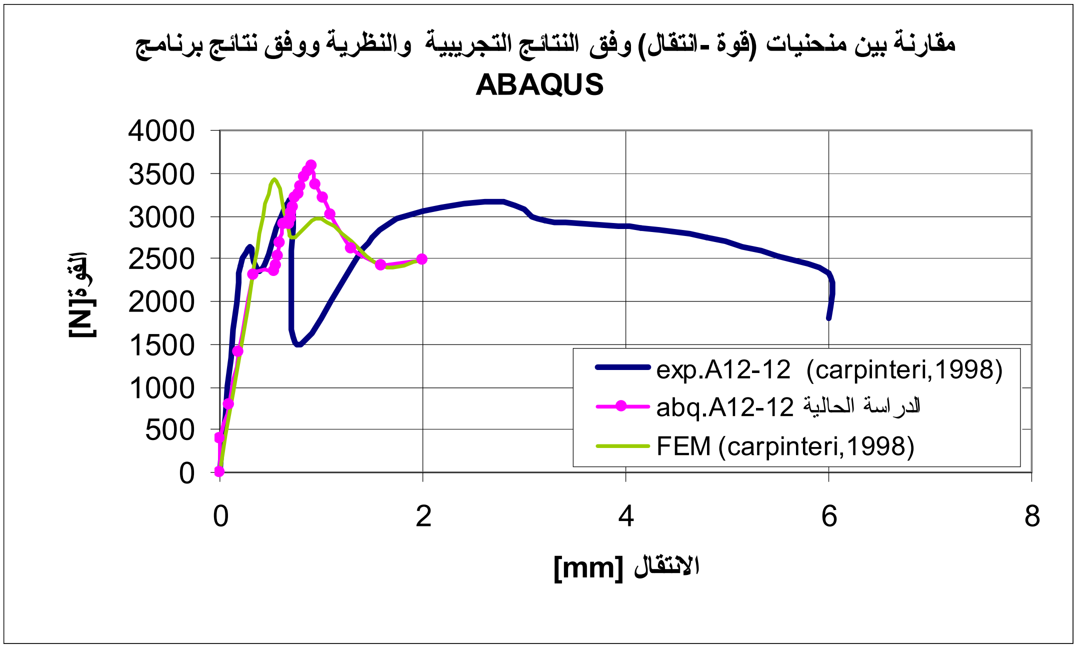
سيتم فيما يلي عرض النتائج التي أمكن التوصل إليها من خلال اعتماد برنامج ABAQUS للحالات المدرجة في الجدول (7-2).



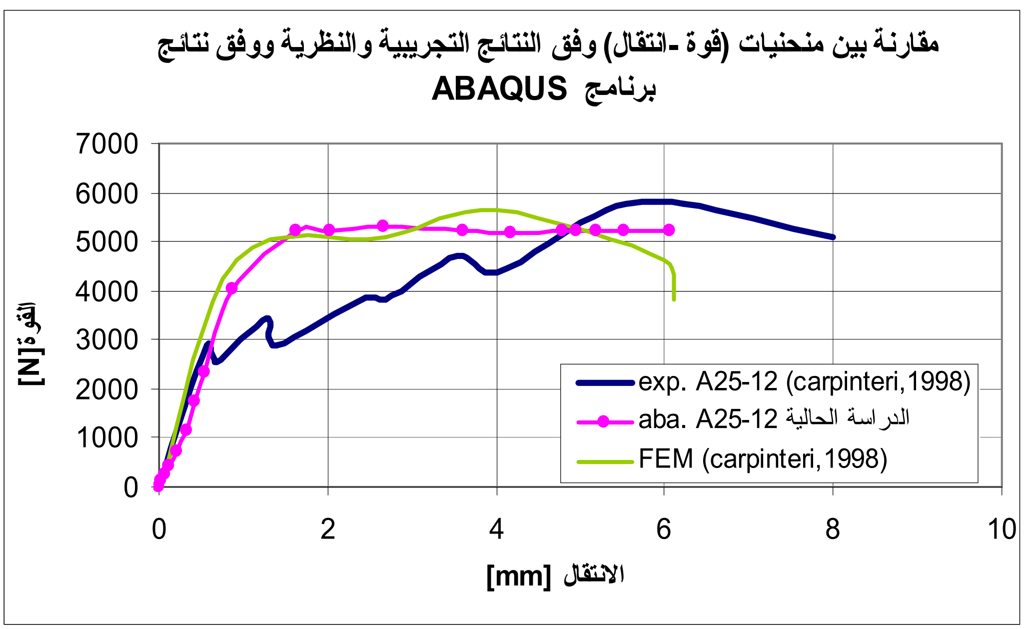
الشكل (7-32) منحنيات قوة – انتقال لمقطع A 100×100 mm2 مع نحافة 6 ونسبة تسليح 0.20%.



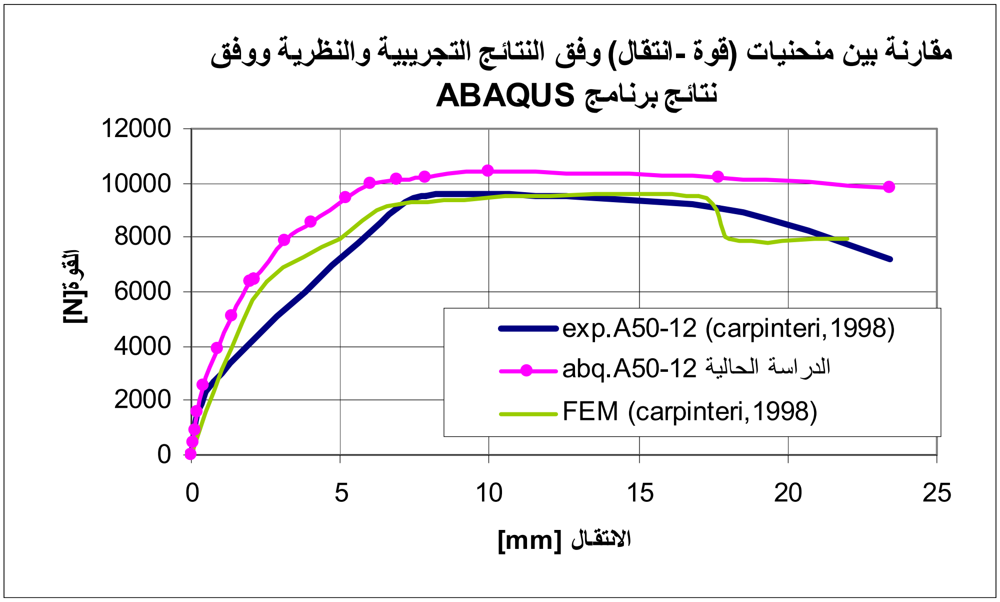
الشكل (7-33) منحنيات قوة-انتقال من أجل مقطع A100×100 mm2 مع نحافة 6 ونسبة تسليح 0.39%.



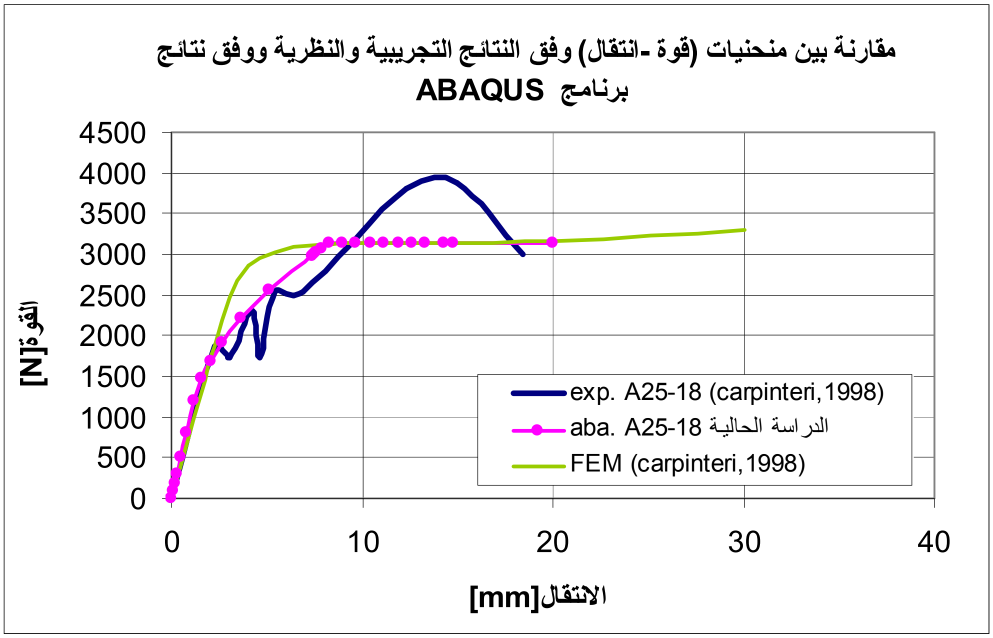
الشكل (7−34) منحنيات قوة−انتقال من أجل مقطع A100×100 mm2 مع نحافة 12 ونسبة تسليح 0.20%.



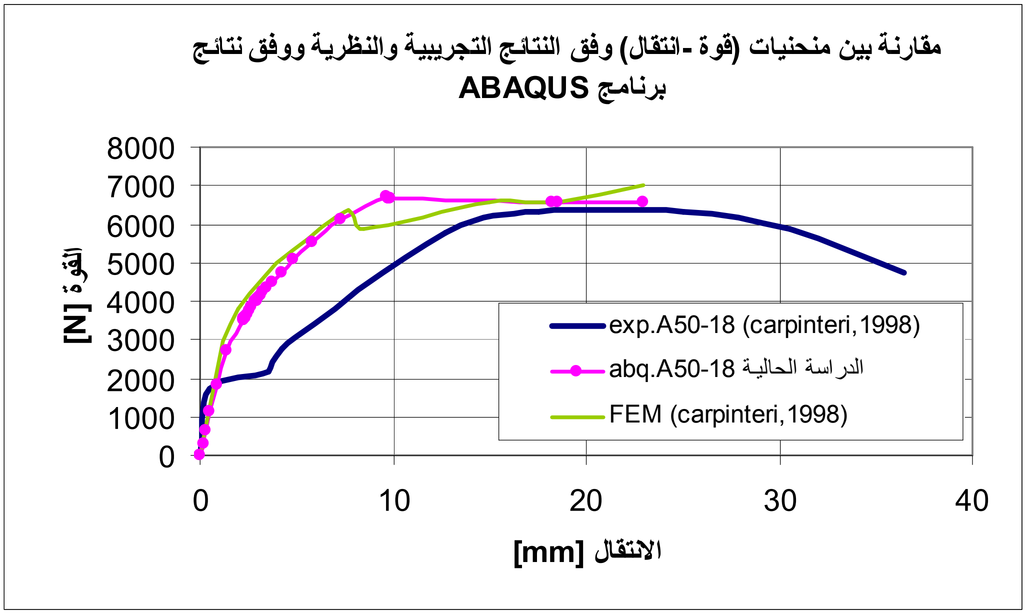
الشكل (7−35) منحنيات قوة−انتقال من أجل مقطع A100×100 mm2 مع نحافة 12 ونسبة تسليح 0.39%.



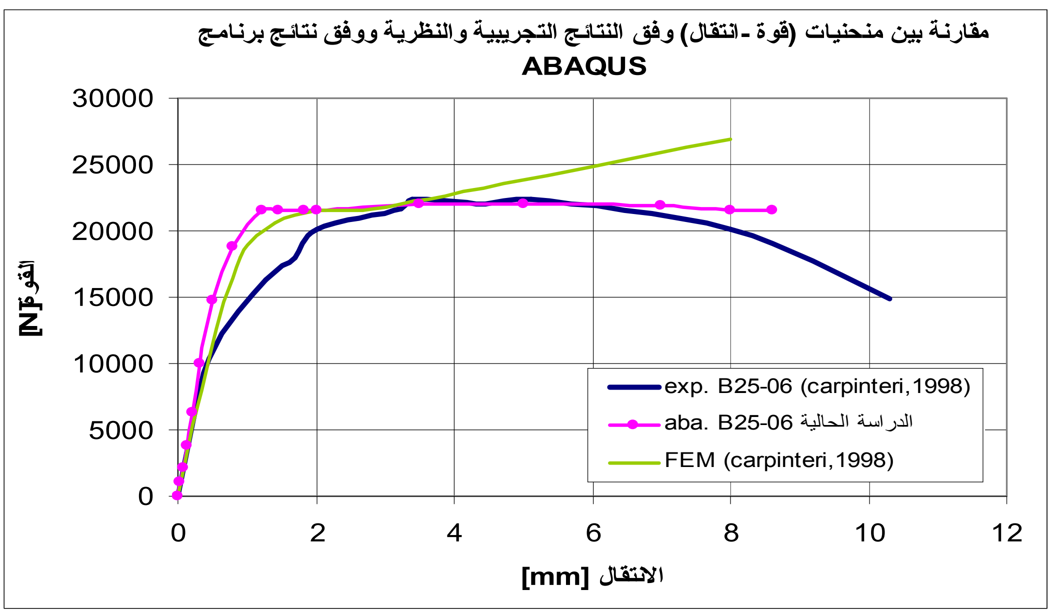
الشكل (7–36) منحنيات قوة–انتقال من أجل مقطع A100×100 mm2 مع نحافة 12 ونسبة تسليح 0.50%.



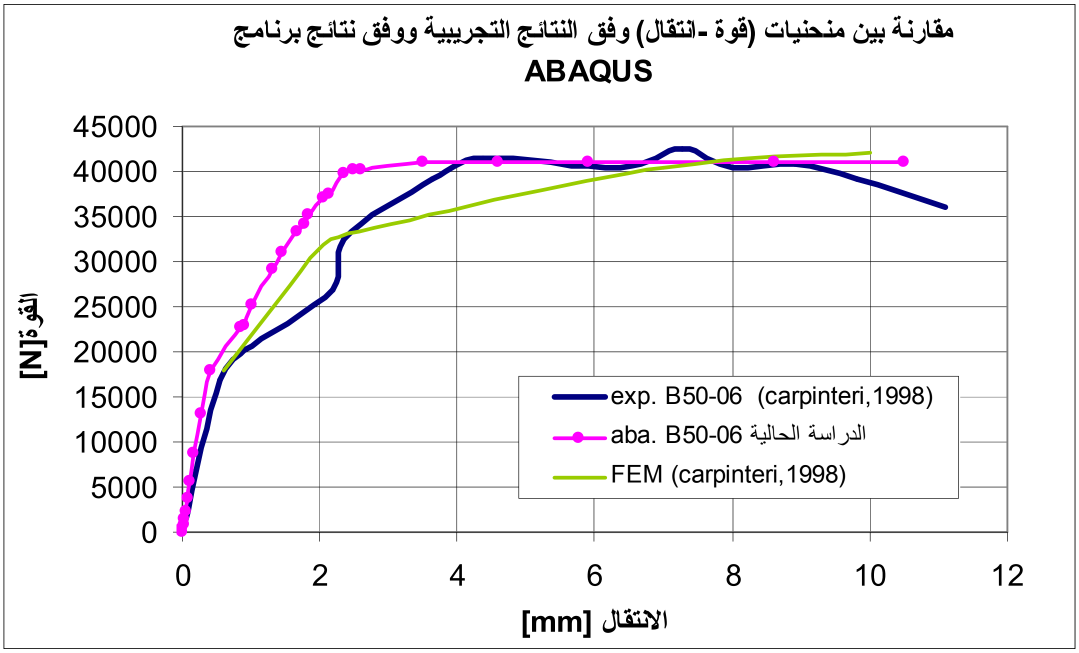
الشكل (7–37) منحنيات قوة–انتقال من أجل مقطع A100×100 mm2 مع نحافة 18 ونسبة تسليح 0.39%.



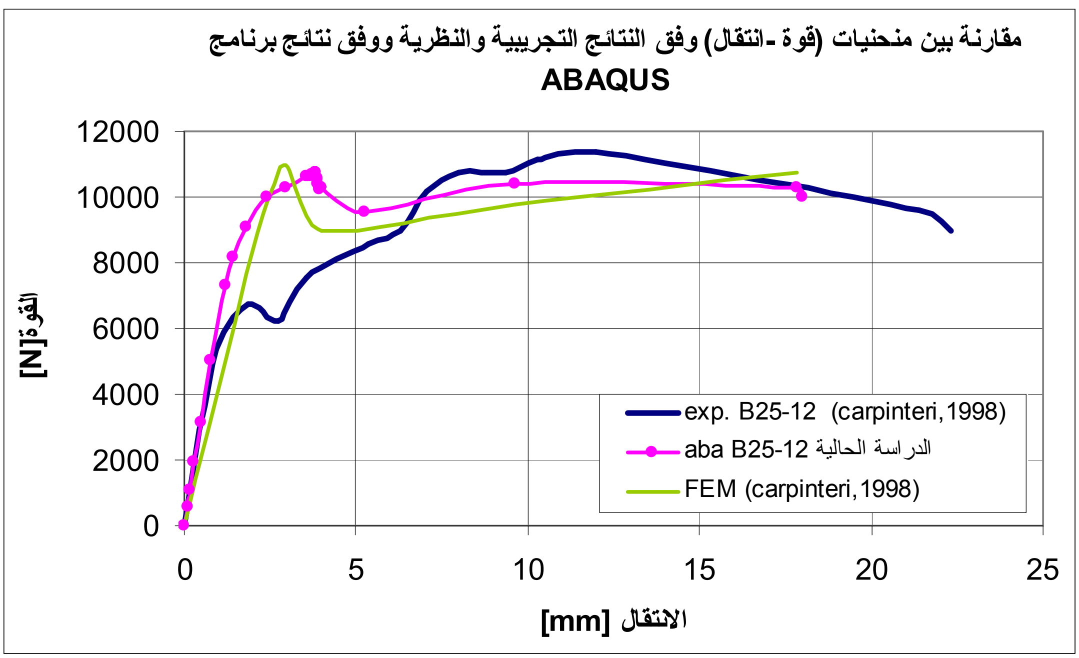
الشكل (7–38) منحنيات قوة–انتقال من أجل مقطع A100×100 mm2 مع نحافة 18 ونسبة تسليح 0.50%



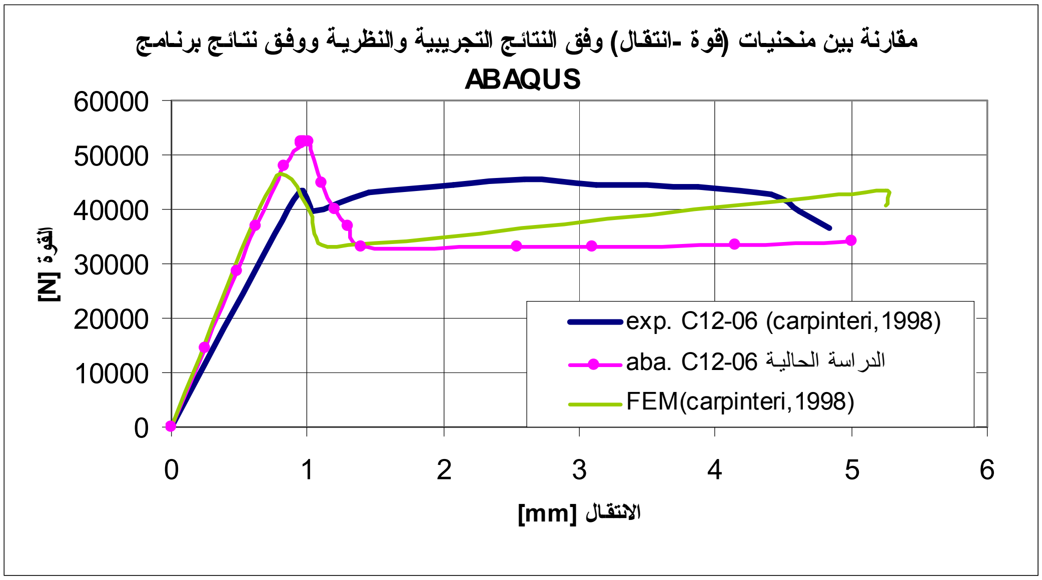
الشكل (7–39) منحنيات قوة–انتقال من أجل مقطع B100×200 mm2 مع نحافة 6 ونسبة تسليح 0.25%.



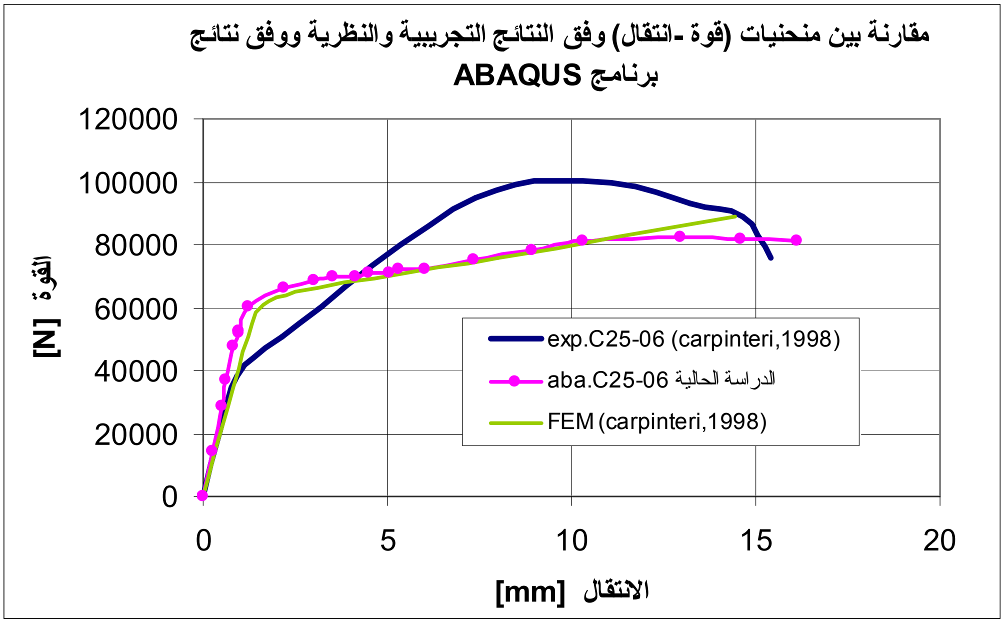
الشكل (7–40) منحنيات قوة–انتقال من أجل مقطع B100×200 mm2 مع نحافة 6 ونسبة تسليح 0.50%.



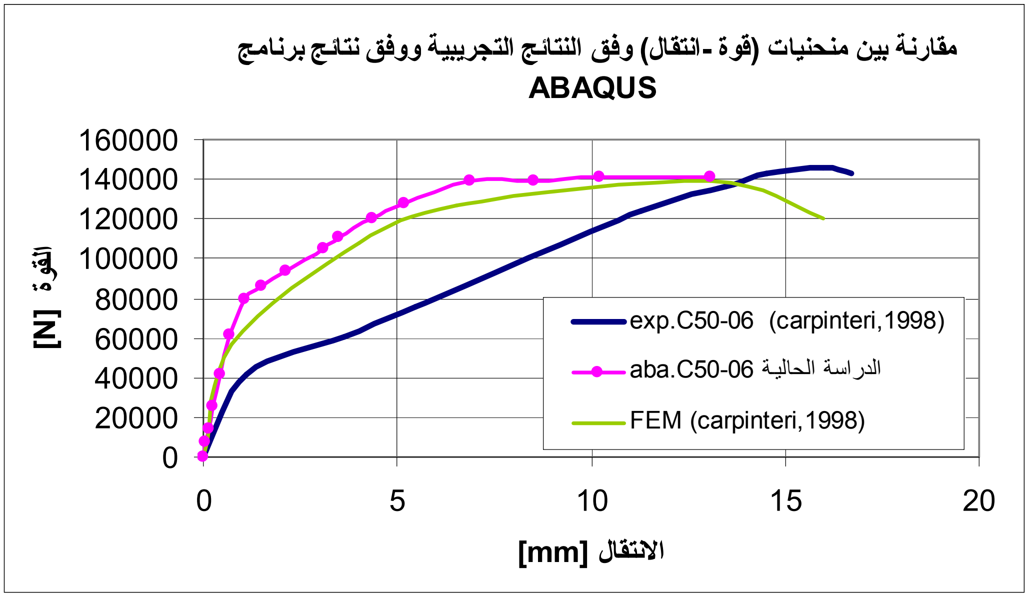
الشكل (7–41) منحنيات قوة–انتقال من أجل مقطع B100×200 mm2 مع نحافة 12 ونسبة تسليح 0.25%.



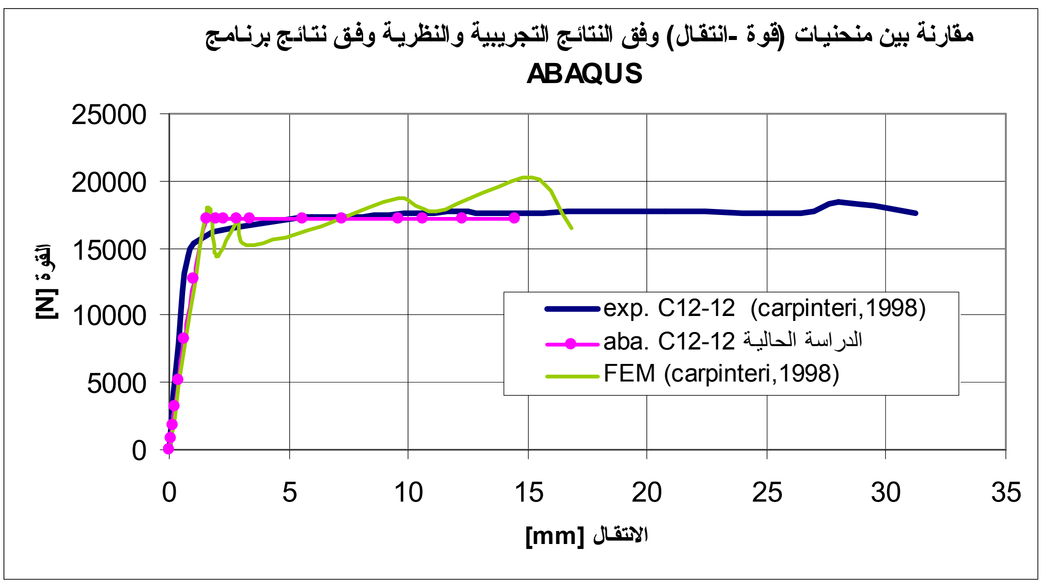
الشكل (7−42) منحنيات قوة−انتقال من أجل مقطع C200×400 mm2 مع نحافة 6 ونسبة تسليح 0.12%.



الشكل (7−43) منحنيات قوة−انتقال من أجل مقطع C200×400 mm2 مع نحافة 6 ونسبة تسليح 0.25%.



الشكل (7–44) منحنيات قوة–انتقال من أجل مقطع C200×400 mm2 مع نحافة 6 نسبة تسليح 0.50%



الشكل (7–45) منحنيات قوة–انتقال من أجل مقطع C200×400 mm2 مع نحافة 12 ونسبة تسليح .0.12%

ن خلال المنحنيات السابقة نجد أن هناك تقار ب كبير بين النتائج النظرية والنتائج التي أمكن الحصول عليها باستخدام برنامج ABAQUS، كذلك نلاحظ أن هناك تقارب مقبول بين النتائج التجريبية ونتائج برنامج ABAQUS على اعتبار أن نتائج النمذجة تمثل الحالة المثالية في حين أن النتائج التجريبية تمثل الحالة الحقيقية.

4-7 الخلاصة:

تم في هذا الفصل نمذجة جوائز تم اختبارها من خلال دراسات تجريبية وذلك باستخدام برنامج ABAQUS، ومن ثم تم مقارنة النتائج التي حصلنا عليها من برنامج ABAQUS مع النتائج التجريبية والنظرية لنرى مدى صحة النموذج المقترح.

تم الوصول إلى نتائج مقاربة للنتائج التجريبية والنظرية الخاصة بالنموذج الأول وهو نموذج ميكانيكية الانكسار من خلال استخدام برنامج ABAQUS، وعليه يمكن اعتماد نتائج النمذجة للحصول على النتائج لأمثلة مختلفة والتي يمكن أن تعطي تقارب فيما لو أجري لهذه النماذج تجارب عملية.

النتائج والتوصيات

1. النتائج

- تتساوى قيمة نسبة التسليح الأصغري وفق الكود الأوروبي مع الكود السوري عند قيمة لـ $f`_c=$ 40 [MPa] بحيث يكون الترتيب التصاعدي للكودات قبل هذه القيمة :

  الكود الروسي– الكود الأوروبي– الكود السوري– الكود الأمريكي.

  وبعد هذه القيمة تصبح قيم الكود الأوروبي أكبر من قيم الكود السوري.

- قيم النسب الأصغرية للتسليح وفق النموذج الأول نموذج ميكانيكية الانكسار أصغر من قيم النسب الأصغرية التي يعطيها الكود العربي السوري، ويصبح الفرق بينهما أكبر كلما كان الارتفاع أكبر.

- قيم النسب الأصغرية للتسليح وفق النموذج الثاني نموذج الطول الفعّال للانزلاق بحالة التماسك الضعيف أقل من قيم النسب الأصغرية حسب الكود العربي السوري وذلك من أجل جميع البارامترات المدروسة، ولكن تتقارب قيمهما مع زيادة مقاومة البيتون على الضغط f_c.

- تصبح قيم النسب الأصغرية وفق النموذج الثاني بحالة التماسك القوي للتسليح أقرب إلى قيم الكود السوري مع زيادة قيمة إجهاد خضوع الفولاذ وثبات باقي البارامترات.

- تصبح قيم النسب الأصغرية للتسليح وفق الكود العربي السوري أكبر بشكل واضح من قيم باقي النماذج
  - ➢ عندما تكون قيم مقاومة البيتون على الضغط أقل من 40 [MPa].
  - ➢ عندما يكون إجهاد خضوع التسليح أكبر من 400 [MPa].
  - ➢ عند قيم للتغطية أكبر أو تساوي 4 [cm].

وعليه يمكن إعادة النظر في تحديد نسبة التسليح الأصغري عند الحالات السابقة عما هو وارد في الكود العربي السوري.

- تم الوصول إلى نتائج مقاربة للنتائج التجريبية والنظرية الخاصة بالنموذج الأول من خلال استخدام برنامج ABAQUS، وعليه يمكن اعتماد نتائج النمذجة للحصول على النتائج لأمثلة مختلفةو التي يمكن أن تعطي تقارب فيما لو أجري لهذه النماذج تجارب عملية.

2. التوصيات

- تم في هذه الدراسة دراسة الجوائز البيتونية مستطيلة المقطع، يقترح في دراسات قادمة دراسة أشكال أخرى من المقاطع.
- اقتصرت هذه الدراسة على دراسة جوائز معرضة للانعطاف، يقترح في دراسات قادمة دراسة أنواع أخرى من العناصر (بلاطات، أعمدة ...) معرضة لقوى أخرى (ضغط مركزي، شد مركزي، ....) لتحديد نسب تسليح أصغري فيها.
- تم في هذه الدراسة دراسة نسبة التسليح الأصغرية من أجل قضبان واقعة أسفل الجائز، يقترح في دراسات قادمة أخذ أثر توزع قضبان التسليح في المقطع وكذلك القطر المستخدم على نسبة التسليح الأصغرية.
- يقترح أخذ تأثير الإجهادات الذاتية لما لها من تأثير واضح في حال الارتفاعات الكبيرة .
- يمكن إجراء دراسات مستقبلية تأخذ بعين الاعتبار تأثير التماسك الوارد في النموذج الثاني نموذج الطول الفعّال للانزلاق.

References المراجع

[1] الكود العربي السوري لتصميم وتنفيذ الخرسانة البيتونية المسلحة نقابة المهندسين 2004.

[2] "حول أداء الكمرات البيتونية المسلحة بأقل من النسبة الدنيا المحسوبة وفقاً للكود السوري"، د.غسان محمود، كلية الهندسة المدنية، جامعة دمشق.

[3] عيسى، مهاباد.، دراسة في السلوك المتبادل بين المادة الرابطة والألياف الزجاجية في الخرسانة المسلّحة بها" رسالة ماجستير في الهندسة الانشائية، جامعة دمشق، 2009.

[4] ABAQUS 6.5. "Release 6.5 Documentation for ABAQUS", ABAQUS. Inc, 2004 .

[5] ACI 318-02 " Building Code Requirements for Structural Concrete " American concrete institute, 2002.

[6] Brincker, R., Henriksen, M.S., "Size Effects on The Bending Behavior of Reinforced Concrete Beams " Aalborg University, Denmark, 1998.

[7] Bruckner, M., Eligehausen, R., "Minimum Reinforcement in RC Beams" University of Stuttgart, Institute for Construction Material, 1998.

[8] Carpinteri, A., Ferro, G., Bosco, C., Elkatieb, M., "Scale effects and transitional failure phenomena of reinforced concrete beams in flexure". In: Carpinteri A (ed) Minimum reinforcement in concrete members, Elsevier Science, 1999.

[9] Carpinteri, A., "Minimum Reinforcement in Concrete member" Elsevier Applied Science , 1998.

[10] CEB-FIP Model Code (1991) " CEB-FIP Model Code 1990, Final Draft". In: *bulletin D`Information,* N 203, 204, 205, EFP Lausanne.

[11] Eurocode-02," Design of concrete structures (ENV 1992-1)" Commission of the European Communities, October 2001.

[12] Fantilli, A.P., Vallini, P., "Behaviour of RC Element in Bending and Tensions : The Problem of Minimum Reinforcement Ratio" Department of structural Engineering, Torino, Italy 1999.

[13] Ferro, G., Carpinteri, A., Ventura, G., "Minimum Reinforcement in Concrete Structures and Material-Structural Instability" International Journal of Fracture, 213-231, 2007.

[14] Helmus, Manfred " Mindestbewehrung Zwangbeanspruchter Dicker Stahlbetonbauteile", 1991.

[15] Hawkins,N., Hjorsetet,K., "Minimum reinforcement requirement for concrete flexural members". In: *Applications of fracture mechanics to reinforced concrete*, A. Carpinteri (Ed.) Elsevier Applied Science, London, pp 379– 412, 1992.

[16] Ozbolt,J., ,Bruckner,M., "Minimum Reinforcement Requirement For RC Beams" University Stuttgart, Germany 1999.

[17] Ruiz,G., , Elices,M., Planas,J., "Size Effect and Bond Slip Dependence of Lightly Reinforced Concrete Beams" Ciudad universitaria, Madrid, Spain 1996.

[18] SNIP 2.03.01-84 "Beitonnyje:Zelezobetonnyje konstrukcyje" Normy Projektirowania. Moskwa 1984.

بعض المواقع الالكترونية المستخدمة

http://www.springerlink.com

http://www.sciencedirect.com

www.scitation.aip.org

http://md1.csa.com

http://effectmatrix.com

قائمة الأشكال والجداول

- **قائمة الأشكال**

- **قائمة الجداول**

جدول المحتويات